



HAL
open science

La Station Laser Ultra Mobile - De l'obtention d'une exactitude centimétrique des mesures à des applications en océanographie et géodésie spatiales

Joëlle Nicolas

► **To cite this version:**

Joëlle Nicolas. La Station Laser Ultra Mobile - De l'obtention d'une exactitude centimétrique des mesures à des applications en océanographie et géodésie spatiales. Autre. Université Nice Sophia Antipolis, 2000. Français. NNT: . tel-00007083

HAL Id: tel-00007083

<https://theses.hal.science/tel-00007083>

Submitted on 11 Oct 2004

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

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

UNIVERSITE DE NICE - SOPHIA ANTIPOLIS
FACULTES DES SCIENCES
Ecole Doctorale de Sciences Fondamentales et Appliquées

Observatoire de la Côte d'Azur – CERGA
Avenue Nicolas Copernic, 06130 Grasse

THESE

présentée pour obtenir le titre de
Docteur en SCIENCES mention SCIENCES DE L'UNIVERS

par

Joëlle NICOLAS

La Station Laser Ultra Mobile
De l'obtention d'une exactitude centimétrique des mesures
à des applications en océanographie et géodésie spatiales

Soutenue à l'Observatoire de la Côte d'Azur le 7 décembre 2000, devant le jury composé de :

<i>M. Albert BIAOUI</i>	<i>Président du jury</i>
<i>M. Gerhard BEUTLER</i>	<i>Rapporteur</i>
<i>Mme Martine FEISSEL</i>	<i>Rapporteur</i>
<i>M. Yves MENARD</i>	<i>Rapporteur</i>
<i>M. Pierre EXERTIER</i>	<i>Examineur</i>
<i>M. Michel KASSER</i>	<i>Directeur de thèse</i>
<i>M. Francis PIERRON</i>	<i>Codirecteur de thèse</i>
<i>M. François BARLIER</i>	<i>Invité</i>
<i>Mme Jennifer HAASE</i>	<i>Invitée</i>

REMERCIEMENTS

Je voudrais exprimer ici toute ma reconnaissance envers toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Mes remerciements s'adressent tout d'abord aux personnes qui m'ont proposé ce sujet de thèse enrichissant et qui m'ont guidée tout au long de ces trois ans de recherches.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers **François BARLIER** pour la qualité de son encadrement. Sa gentillesse, sa disponibilité, son professionnalisme et nos nombreuses discussions, à la fois sur mes recherches et sur des points plus personnels, ont constitué un soutien essentiel tout au long de cette thèse.

Je remercie également **Michel KASSER** pour ses qualités scientifiques et sa supervision de l'orientation et de l'avancée de mon travail de thèse, malgré un éloignement géographique important.

Mes plus sincères remerciements s'adressent également à **Francis PIERRON** pour son encadrement et ses explications techniques m'ayant permis de mieux appréhender le fonctionnement des stations laser et donc la physique de la mesure.

Je tiens aussi à exprimer ma profonde gratitude à **Pierre EXERTIER** pour son encadrement dynamique concernant toute la partie analyse de données, sa sympathie, son enthousiasme, sa disponibilité malgré un emploi du temps souvent surchargé et son aide très précieuse tant au niveau théorique que pratique.

Je souhaite également remercier pour son accueil chaleureux tout le **personnel de l'OCA** que j'ai côtoyé au plateau de Calern et à Grasse. Je remercie spécialement **François MIGNARD**, directeur du CERGA, ainsi que les membres des équipes «Laser» et «Géodésie et Mécanique Céleste» pour leur gentillesse, leurs encouragements et pour m'avoir offert des conditions de travail plus qu'agréables.

Je remercie l'OCA, le CNES, la **Région PACA** de m'avoir offert l'opportunité de faire cette thèse. Merci à la société **ACRI** et plus particulièrement à **Jennifer HAASE** pour le parrainage de la thèse, pour son aide et pour les rencontres scientifiques qu'elle organise.

Chaleureux remerciements à **Pierre ENCRENAZ** pour m'avoir montré tout l'intérêt de travailler à la fois sur les plans instrumentaux et scientifiques, au cours de nombreuses discussions enrichissantes et motivantes.

Mes plus sincères remerciements s'adressent également à **Monique AUBIER** pour avoir accepté de parrainer ma thèse, pour ses discussions intéressantes et sa très grande sympathie.

Je tiens à exprimer ma très grande reconnaissance à **Etienne SAMAIN** pour ses discussions très enrichissantes dans la recherche d'une exactitude toujours accrue. Je salue ses grandes qualités de physicien capable d'appréhender tous les aspects de la mesure, ses compétences en métrologie de haute précision, sa grande disponibilité et sa sympathie. Son aide fut essentielle pour mettre au point certaines modifications techniques de la station mobile à des moments stratégiques.

Merci également à **Alain SPANG** pour son aide lors de quelques réglages et mesures ainsi que pour nos discussions m'ayant apporté une compréhension plus approfondie de divers aspects du sujet.

Je voudrais aussi exprimer ma gratitude à tous les **observateurs** de la station laser satellites fixe pour les mesures qu'ils ont faites sur les satellites LAGEOS. Que l'équipe du laser Lune trouve aussi ici ma reconnaissance pour leurs observations en dépit des modifications techniques et logicielles.

Je remercie **Jean-Louis HATAT** pour le travail qu'il a réalisé sur la station mobile et pour ses échanges réguliers d'informations. Je salue aussi son aide et sa sympathie.

J'exprime également ma reconnaissance à **Etienne CUOT**, **Hervé VIOT**, **Maurice LAPLANCHE** et **Jocelyn PARIS** pour leurs contributions techniques et logicielles indispensables à la mise en place de toutes les modifications dans les délais.

Je remercie profondément **Pascal BONNEFOND** qui a contribué non seulement à ma compréhension des problèmes liés à l'étalonnage des altimètres radar embarqués et à l'ajustement de coordonnées, mais également à la résolution des difficultés que j'ai rencontrées avec l'utilisation des outils informatiques qu'il a développés. Je lui suis également très reconnaissante pour sa patience, sa disponibilité et son aide à diverses étapes de mon travail.

Qu'**Olivier LAURAIN** soit chaleureusement remercié pour l'accueil favorable qu'il a toujours réservé à mes questions ou discussions. Il m'a aussi apporté une aide précieuse dans ce travail de recherche pour réaliser notamment l'automatisation de mes calculs de séries temporelles laser.

Je tiens aussi à remercier **Yves BOUDON** pour certains calculs d'orbite dont je me suis servie au début de l'analyse des données, Yves qui nous a bien manqué suite à son départ en retraite.

Je salue **David COULOT** et **Florent DELEFLIE** pour leurs conseils et nos discussions enrichissantes.

Je remercie **Eric CALAIS** ainsi que **Jacques HINDERER** et **Martine AMALVICT** pour m'avoir fourni respectivement les données GPS et les mesures de gravimétrie sans lesquelles une partie de cette thèse n'aurait pu être réalisée. Je remercie aussi **Jean-Jacques WALCH** pour ses explications sur les mesures gravimétriques et les études géophysiques menées au plateau de Calern. La confrontation des différents résultats n'en a été que plus enrichissante.

Mes remerciements vont également à **Ana DE LA BARREDA** et **Camino RODRIGUEZ** pour leur modélisation d'une partie des effets géophysiques essentielle à mon étude.

Je remercie vivement **Jean-Michel LEMOINE** pour son accueil chaleureux, sa disponibilité, sa sympathie et la qualité du travail réalisé en sa compagnie sur les séries temporelles laser. Je remercie aussi **Sylvain LOYER** et **Richard BIANCALE** pour l'intérêt constant qu'ils ont porté à mon travail.

J'ai également eu l'occasion de participer à des échanges très enrichissants sur les problèmes liés aux séries temporelles avec **Zuheir ALTAMIMI**, **Jean-François CRETAUX**, **Daniel GAMBIS**, **Ron NOOMEN**, **Félix PEROSANZ**, **Patrick SILLARD** et aux aspects technologiques avec notamment **Graham APPLEBY**, **John DEGNAN**, **Georg KRICHNER** et **Ulrich SCHREIBER**. Qu'ils en soient ici remerciés.

Je suis très reconnaissante à **Martine FEISSEL**, **Gerhard BEUTLER** et **Yves MENARD** d'avoir accepté la lourde tâche de rapporteurs. Leurs commentaires et leurs questions, tant sur la forme que sur le fond du document, ont contribué à l'améliorer de manière significative. Je remercie notamment **Martine FEISSEL** pour les réflexions, les questions et les conseils qu'elle m'a prodigués dans les quelques occasions où nous nous sommes rencontrés et pour son jugement scientifique d'excellente qualité. Mes vifs remerciements vont aussi aux autres membres du jury qui me font l'honneur d'évaluer mon travail, et plus particulièrement à **Albert BIJAOU**, président du jury.

Mes plus affectueuses pensées vont à **Stéphane** sans qui je n'aurais jamais terminé cette thèse. Je le remercie pour son appui, sa compréhension et sa patience en dépit d'un éloignement géographique important. Je remercie également ma **famille** et mes **amis** qui m'ont toujours encouragée dans les études et pour leur soutien moral continu et essentiel dans des moments de doute ou de surcharge de travail. C'est à eux tous que finalement je désire dédier cette thèse de doctorat.

TABLE DES MATIERES

<i>Remerciements</i>	3
<i>Table des matières</i>	5
<i>Remarques préalables : notions de métrologie</i>	9
<i>Introduction</i>	11
Chapitre 1 Télémétrie Laser et Géodésie Spatiale	15
1. Télémétrie laser	16
1.1. Principe de la mesure	16
1.2. Les différents satellites observés	18
1.3. Le réseau international de stations laser	23
2. Applications en géosciences	25
2.1. Positionnement et géodynamique	26
2.2. Océanographie spatiale	28
Etalonnage des altimètres spatiaux	30
Orbitographie de précision	31
2.3. Transfert de temps	32
3. Intérêt de l'association des différentes techniques de géodésie spatiale	34
Forces et faiblesses de la télémétrie laser	36
Chapitre 2 Instrumentation	41
1. Introduction	41
Différentes sources d'erreur	42
Situation en télémétrie laser	42
2. Les stations de télémétrie laser de l'OCA	45
2.1. La station laser fixe	45
2.2. La station laser Lune	46
2.3. La Station Laser Ultra Mobile	47
3. Etalonnage des stations laser	57
3.1. Principe	57
3.2. Différentes procédures d'étalonnage	58
3.2.a Cas des stations laser du plateau de Calern	58
3.2.b Modification apportée à la FTLRS	60
3.3. Rattachement géodésique	63
3.4. Importance de l'étalonnage dans la recherche d'une exactitude centimétrique	63
3.4.a Conditions de mesures	63
3.4.b Contrôle de la qualité des mesures	64
3.4.c Quelques recommandations	65

4. _ Sources d'incertitude instrumentales et améliorations apportées à la FTLRS en vue de l'obtention d'une exactitude centimétrique	67
4.1. Introduction	67
4.2. Le laser	68
4.2.a Qualités requises pour l'émetteur laser	68
4.2.b Améliorations apportées au laser de la FTLRS	71
Changement de la longueur d'onde d'émission du laser	71
Diminution de la largeur des impulsions laser	71
Régulation thermique du laser	72
Augmentation de la stabilité opto-mécanique du banc laser	73
4.3. Les systèmes de détection	74
4.3.a Spécifications requises	74
4.3.b Améliorations apportées aux systèmes de détection de la FTLRS	80
Installation d'une C-SPAD comme détecteur de retour	80
Mise en place d'un obturateur électro-optique	81
Amélioration du système de détection de départ des impulsions laser	83
Remarques sur l'utilisation d'un détecteur unique	84
Suppression de la transmission du signal de retour par les contacts tournants de la tourelle	85
Préparation de l'expérience T2L2	86
Création d'un foyer secondaire dans le télescope	87
Etude de la conduction thermique de la tourelle	88
4.4. La chaîne de chronométrie	88
4.4.a Spécifications requises pour atteindre une exactitude centimétrique	88
4.4.b Amélioration apportée à la chaîne de chronométrie de la FTLRS	89
4.5. Système de poursuite	89
4.5.a Capacités nécessaires	89
4.5.b Cas de la FTLRS	90
5. Autres sources importantes d'inexactitude	91
5.1. Signature du satellite	91
Effets de la disposition des rétroreflecteurs	92
Autres effets liés à la signature du satellite	94
Exemple d'études technologiques	96
Exemple d'étude dans le cas du satellite AJISAI	96
5.2. Effets de l'atmosphère	97
Modèle de Marini-Murray pour la correction de réfraction atmosphérique	99
Autres effets de la propagation dans l'atmosphère	100
Erreurs sur la correction de propagation atmosphérique	101
Conclusion	104
6. Bilan d'erreur après analyse en laboratoire	105
6.1. Etude du photodétecteur de retour	105
6.1.a Banc expérimental	105
6.1.b Résultats expérimentaux	107
6.2. Chronométrie	111
6.2.a Méthode d'estimation	111
6.2.b Résultats expérimentaux	112
6.3. Laser	114
6.4. Bilan d'erreur global	114
7. Conclusion	117
 Chapitre 3 Analyse de données	 119
1. Introduction	119
2. Expérience de co-localisation	121

3. Méthode	122
3.1. Hypothèses de calcul	122
3.2. Les données étudiées	125
3.3. Orbitographie	125
3.4. Biais instrumental moyen	127
3.5. Positionnement	128
4. Résultats	128
4.1. Biais instrumental annuel moyen	128
4.2. Séries temporelles laser à l'OCA	129
4.3. Comparaison avec les mesures gravimétriques et GPS	134
4.3.a Gravimétrie	134
4.3.b GPS	135
4.4. Etude plus globale	136
5. Analyse des sources de variations d'altitude	147
6. Conclusion	149
<i>Conclusion et perspectives</i>	153
<i>Annexe A Description succincte des différentes techniques de géodésie spatiale</i>	159
1. Interférométrie VLBI	159
2. Mesures radioélectriques	159
GPS	160
GLONASS	161
DORIS	161
PRARE	162
<i>Annexe B Quelques exemples d'autres stations laser dans le monde</i>	163
1. MLRO	163
2. TIGO	163
3. SLR2000	165
<i>Annexe C Le gravimètre absolu portable FG5</i>	167
<i>Annexe D Mesures laser et points normaux</i>	169
<i>Annexe E Publications et autres contributions scientifiques</i>	171
<i>Références bibliographiques</i>	237
<i>Table des illustrations</i>	247
<i>Liste des tableaux</i>	251
<i>Acronymes</i>	253

REMARQUES PREALABLES : NOTIONS DE METROLOGIE

Il peut être utile de rappeler quelques notions de métrologie employées dans ce document.

La **précision** d'un ensemble de mesures définit un intervalle à l'intérieur duquel chaque mesure devrait être comprise avec un niveau de confiance donné (indépendamment de la position de cet intervalle). En général, on l'exprime par une évaluation moyenne des erreurs accidentelles et l'estimateur souvent utilisé est l'écart-type ; la précision est déduite de la dispersion des mesures d'une même grandeur. Ainsi, plus les mesures sont convergentes ou concentrées autour d'une valeur unique, plus précis sera le résultat. Dans la suite de ce document, la précision d'une mesure de distance correspondra à l'écart-type de la mesure. La précision dépend de l'instrument et du procédé de mesure. Des mesures sont de même précision s'il y a équivalence des instruments, équivalence des observateurs et similitudes des conditions de mesure.

L'**exactitude**, quant à elle, correspond au degré de conformité d'une valeur, mesurée ou calculée, par rapport à sa valeur réelle dans des limites de probabilités indiquées. Elle se réfère donc aux erreurs reproductibles et systématiques, mais a priori inconnues.

La **stabilité** représente la précision de la moyenne d'une série de mesures pendant un certain temps τ .

INTRODUCTION

La télémétrie laser sur satellites a pour objectif de déterminer des distances de satellites artificiels en orbite autour de la Terre. Cette technique de géodésie spatiale est basée sur la mesure précise du temps de vol aller-retour de brèves impulsions lumineuses entre une station au sol et un satellite équipé de rétro réflecteurs laser. Elle offre l'avantage d'être à la fois très simple au niveau du concept et de fournir des mesures d'une précision centimétrique. Ce procédé a connu un essor considérable au cours des dernières décennies et reste une méthode éprouvée et fiable avec un réseau de stations opérationnel de grande qualité. L'effort est actuellement porté sur l'amélioration de la précision des mesures.

Aujourd'hui, un réseau international constitué d'une quarantaine de stations poursuit environ vingt satellites artificiels. De nombreuses applications scientifiques interdisciplinaires et des recherches en ingénierie sont associées à ce type d'observations. Ces stations présentent bien sûr certaines différences, à la fois en termes d'instrumentation et de performances. Par ailleurs, les coûts et les technologies mis en jeu font qu'elles sont concentrées dans les pays développés, c'est-à-dire principalement dans l'hémisphère Nord. Ce sont des instruments complexes constitués généralement de plusieurs tonnes de matériel. Les quelques stations dites mobiles jusqu'à ce jour ne se déplacent en réalité qu'à grands frais. Par conséquent, la répartition géographique des observations n'est pas aussi homogène que souhaitable, tandis qu'une couverture plus uniforme contribuerait mieux à la qualité globale des orbites et des produits géodésiques qui en sont issus.

La Station Laser Ultra Mobile, dont il est question dans ce document, est communément appelée par les initiales de son nom anglais, à savoir FTLRS pour *French Transportable Laser Ranging Station*. Elle a été conçue puis développée au sein de l'Observatoire de la Côte d'Azur (OCA), en collaboration avec le CNES, l'IGN et l'INSU. Correspondant à un nouveau concept d'instrument, elle constitue un projet résolument nouveau et ambitieux puisqu'il s'agit de la plus petite station de télémétrie laser sur satellites au monde. En effet, le résultat final est un instrument facilement transportable pesant 300 kg répartis en dix colis dont le plus lourd ne dépasse pas 55 kg.

Cet instrument est destiné à la mise en place rapide d'une station de télémétrie laser pour des campagnes d'observations limitées dans le temps, en des endroits appropriés pour des mesures de géodésie spatiale. Cette station a plus particulièrement été développée pour participer à des missions d'océanographie spatiale en contribuant à la validation des orbites et à l'étalonnage des altimètres radar embarqués sur des satellites comme TOPEX/POSEIDON (T/P) et ERS-1. Elle doit également participer aux missions JASON-1 et ENVISAT (lancements prévus en 2001). Elle peut jouer aussi un rôle dans des expériences de co-localisations géodésiques, c'est-à-dire avec d'autres stations laser ou d'autres techniques radioélectriques (GPS, DORIS, GLONASS, VLBI, PRARE)¹, et participer à des expériences de Transfert de Temps par Lien Laser (T2L2) pour comparer des étalons atomiques très éloignés les uns des autres.

Après la mise au point de l'ensemble de l'appareillage et le test de la production de mesures, cette nouvelle station mobile a été utilisée pour la première fois au cours d'une mission menée à Ajaccio entre octobre 1996 et février 1997. Le but de cette campagne probatoire était de participer à l'étalonnage précis des altimètres de TOPEX/POSEIDON (T/P) et ERS-2. Il s'agissait également de valider le fonctionnement de la station dans un nouveau site, avec toutes les difficultés liées au fonctionnement d'une station sur le terrain, en dehors des commodités d'un observatoire. La précision moyenne des mesures obtenues au cours de cette période a été estimée à 2 cm avec un biais moyen inférieur au centimètre sur la durée de la campagne [Stoufs, 1997]. Cependant, des instabilités de la précision ont été observées pour 20% des passages, instabilités majoritairement liées à des problèmes instrumentaux. Les exigences d'exactitude des prochaines missions spatiales comme JASON-1 étant

¹ Tous les acronymes employés dans le texte sont explicités en fin de document.

au niveau du centimètre, entraînent la nécessité de réaliser une métrologie au moins deux fois plus performante que celle obtenue durant cette campagne probatoire.

Dans ce contexte, l'objet de mon étude concerne la mise en œuvre des modifications indispensables à apporter à la Station Laser Ultra Mobile afin d'obtenir l'exactitude centimétrique recherchée. Ce niveau d'exactitude est primordial pour réaliser l'étalonnage des altimètres des satellites JASON-1 et ENVISAT. Il s'agit également du niveau de performance requis pour participer à T2L2 avec l'horloge ultra stable PHARAO qui sera embarquée sur la Station Spatiale Internationale vers 2004.

Avec le recul, on se rend compte de l'implication extrême des aspects purement techniques et des aspects liés à une utilisation scientifique. Certaines performances coûteuses peuvent être inutiles. Des points technologiques de détail peuvent au contraire influencer profondément sur les résultats scientifiques. Le lien entre le monde technique et le monde scientifique est apparu indispensable avec un besoin impératif de dialogue, de concertation. En effet, après une évolution parallèle à la fois des techniques instrumentales et d'analyse, le niveau de précision est tel qu'il est plus que jamais indispensable de combiner les deux aspects. C'est précisément ce que j'ai cherché à faire au cours de ma thèse. Mon travail a ainsi consisté en l'élaboration d'une méthode, à la fois liée à l'instrumentation et à l'analyse de données, permettant de qualifier les résultats obtenus.

Ce document est divisé en trois parties.

Dans un premier chapitre, je dresse un panorama de la technique de la télémétrie laser, en indiquant notamment son principe et les thèmes scientifiques associés à ce type d'observations de manière à être en mesure de mieux comprendre l'intérêt de la recherche d'une exactitude de 1 cm.

Le second chapitre montre l'importance et la difficulté d'atteindre un tel niveau d'exactitude centimétrique, en indiquant les différents facteurs limitants et comment certains problèmes très contraignants en termes de qualité des mesures ont été résolus dans le cas de la station mobile. Les améliorations réalisées sur la FTLRS sont alors indiquées et justifiées. Ces modifications, qu'elles soient d'ordre optique, électronique, informatique ou mécanique, concernent principalement le laser et les systèmes de détection. Ces améliorations entraînent le plus souvent des difficultés liées à l'extrême compacité de la station, tant au niveau du laser que de l'ensemble tourelle-télescope.

Afin de qualifier les données de la FTLRS, la contribution de chaque élément au bilan global d'erreurs des instruments a été déterminée puis analysée afin d'évaluer leur exactitude et leur stabilité. Des mesures ont été réalisées pour caractériser la chaîne de chronométrie et les détecteurs. Seule cette démarche point par point peut permettre d'identifier les sources de biais et finalement d'atteindre l'exactitude recherchée. Les résultats obtenus à ce jour sont présentés en dernière partie du second chapitre.

Ensuite, le troisième chapitre expose une analyse de données laser de différentes stations fixes (Europe, Etats-Unis, Australie). Le but est de permettre non seulement la vérification de la qualité des observations, mais aussi l'analyse du comportement géodynamique des sites où sont installées les stations. L'opportunité de disposer au plateau de Calern de trois stations de télémétrie laser, totalement indépendantes et distantes d'une vingtaine de mètres les unes des autres, sera exploitée afin de réaliser une expérience de co-localisation. Cette configuration est unique pour la détection d'erreurs et de biais spécifiques à chacune d'elles et donc de qualifier la station mobile sur le terrain. C'est dans cet objectif qu'est menée, depuis avril 1997, une expérience de co-localisation à l'OCA entre la station laser satellites fixe et le laser Lune, à travers des observations communes des satellites LAGEOS-1 et -2. D'une altitude moyenne de 6 000 km, ces satellites constituent un bon compromis entre les capacités de poursuite de chaque instrument.

Mon travail a mis en évidence l'effet des signaux géophysiques¹ sur le positionnement des stations laser. Il s'agit de variations saisonnières, plus marquées sur la composante verticale, pouvant atteindre une amplitude de 2 cm crête à crête. Leur détection illustre bien tout l'effort réalisé ces trois dernières années sur la stabilité et l'exactitude des stations laser du plateau de Calern, la qualité actuelle des mesures rendant maintenant possible ce genre d'études. De plus, les mesures laser sont complétées par le positionnement d'un récepteur GPS permanent et depuis 1998 par des observations régulières effectuées avec un gravimètre absolu transportable. Après l'exposé de la méthode employée, les résultats de cette co-localisation sont présentés, ainsi qu'une étude des déformations verticales de la croûte terrestre. Cette dernière a été menée en considérant l'ensemble des phénomènes géophysiques pouvant générer de telles variations d'altitude incluant la modélisation des déplacements liés aux marées terrestres, à la marée polaire et aux effets de charges atmosphérique et océanique.

Enfin, quelques perspectives d'utilisations de la Station Laser Ultra Mobile et d'évolutions de la technique laser sont mentionnées ainsi que pour des missions altimétriques et planétaires.

¹ Effets dont la modélisation n'est pas encore réalisée systématiquement dans les analyses de données géodésiques.

Chapitre 1

TELEMETRIE LASER ET GEODESIE SPATIALE

L'étymologie grecque du terme géodésie nous apprend que cette discipline a pour objet de diviser et de partager la Terre, c'est-à-dire d'établir des canevas et des systèmes de référence pour cartographier le globe terrestre. En réalité, cette science va bien au-delà et permet d'étudier de nombreux aspects concernant à la fois notre planète et son environnement proche. La géodésie remonte à l'Antiquité où déjà l'Homme cherchait à connaître son environnement proche ou lointain et notamment la forme de la Terre. La géodésie spatiale, quant à elle, ne date que des années soixante (le premier satellite artificiel, SPOUTNIK-1, a été lancé le 4 octobre 1957). Au début de la géodésie spatiale, les satellites servaient de simples repères de triangulation, comme en leur temps les sommets montagneux ou les clochers d'églises (géodésie géométrique). Mais la géodésie spatiale a aussi pour objet l'étude de la forme et des mouvements de la Terre à l'aide de satellites artificiels. Cette science, située au carrefour de plusieurs disciplines (géophysique, océanographie, mécanique céleste...), utilise des observations à caractère global, acquises sur des périodes de temps parfois longues (plusieurs décennies). On a ainsi des informations sur la forme de la Terre, le champ de gravité, les déformations de la croûte terrestre, les marées océaniques et terrestres, la rotation de la Terre, la circulation océanique...

Les premières expériences de télémétrie laser remontent à 1964 où les premiers échos laser ont été obtenus sur le satellite BEACON EXPLORER 22-B. Les 2 m de précision de ces mesures représentaient une amélioration majeure (de plus d'un ordre de grandeur) par rapport aux radars micro-ondes de l'époque (précision de l'ordre de 50 à 100 m) ou par rapport aux techniques photographiques (précision de l'ordre de 10 à 20 m). La télémétrie laser sur satellites était née.

Aujourd'hui, les satellites ne sont plus seulement des cibles pour l'établissement de réseaux géodésiques au sol (géodésie géométrique) ; on détermine également les forces agissant sur le satellite en même temps que les coordonnées des stations (géodésie dynamique) dont on déduit les modèles de champ de gravité et des forces non gravitationnelles.

Depuis le début des années 1970, la précision des mesures laser n'a cessé de s'améliorer, tandis que le nombre de satellites et de stations augmentait. Le premier satellite entièrement dédié à la télémétrie laser, STARLETTE (CNES), a été lancé en 1975 ; il était destiné à améliorer la connaissance du champ de gravité et le positionnement des stations. En 1976, le lancement du satellite LAGEOS (NASA) a fourni une cible de haute altitude (6 000 km) permettant de réaliser des études précises de positionnement. La précision des mesures était alors de l'ordre du décimètre. Avec le lancement de satellites comme LAGEOS-2 (NASA, 1992) et STELLA (CNES, 1993) ainsi que de satellites d'altimétrie radar de précision comme ERS-1 (ESA, 1991) et T/P (CNES-NASA, 1992), l'augmentation de la constellation laser a entraîné un accroissement important du nombre de données, concomitant à l'augmentation en efficacité opérationnelle de nombreux sites.

Durant la dernière décennie, une cinquantaine de satellites a été poursuivie par la télémétrie laser. Finalement, en trente ans, l'amélioration aura été d'environ un ordre de grandeur par décennie, jusqu'à la précision actuelle. Ainsi, les différentes évolutions technologiques, en phase avec les besoins de la communauté de la géodésie spatiale, ont permis d'améliorer la précision instrumentale interne et de progresser dans la compréhension du signal contenu dans les mesures précises de distance. Aujourd'hui, et ceci depuis la fin des années 1990, cette technologie est passée à une précision meilleure que le centimètre pour environ 70% des stations. Cependant, le problème de l'exactitude de 1 cm de la mesure est plus difficile à approcher du point de vue de la méthodologie, comme nous le verrons dans le Chapitre 2.

Les apports de la communauté laser, tant au niveau technologique que scientifique concernent les thèmes suivants :

- les repères de référence géodésique,
- les modèles du champ de gravité,
- les paramètres de la rotation de la Terre,
- la tectonique des plaques (années 1980),
- l'analyse des sources de variations lentes du champ de gravité (années 1990), connectées au rebond postglaciaire et à l'évolution des transferts de masses globaux entre la Terre, les océans et l'atmosphère,
- l'océanographie,
- la relativité,
- la physique fondamentale,
- la science lunaire.

Au début des années 1990, la communauté laser a commencé à devoir faire face à une intense compétition avec les techniques radioélectriques satellitaires. En dépit de cette nouvelle compétition, l'intérêt international pour la télémétrie laser est demeuré très grand comme le montrent de nombreux développements technologiques, mais il s'est recentré sur certains objectifs, devenant ainsi très complémentaire avec les techniques radioélectriques.

Ce premier chapitre a pour but de dresser un panorama de la technique de la télémétrie laser. Dans une première partie, le principe des mesures laser ainsi que les différentes cibles concernées par ce type d'observations sont exposés et quelques informations sur le réseau international sont données. Dans une seconde partie, la plupart des applications scientifiques issues de l'analyse des données laser, et principalement celles de la station mobile, sont rapidement présentées. Enfin, la complémentarité des différentes techniques au sol de géodésie spatiale est discutée et une comparaison des performances de ces différents systèmes est également donnée.

1. Télémétrie laser

1.1. Principe de la mesure

Les mesures de télémétrie laser sur satellites (*Satellite Laser Ranging – SLR*) correspondent à des mesures chronométriques pour obtenir la distance d'une cible. Cette technique est basée sur la mesure ultra précise du temps de vol aller-retour d'impulsions lumineuses brèves entre une station au sol et un satellite artificiel en orbite autour de la Terre (voir Figure 1.1).

Un faisceau laser est envoyé en direction du satellite à l'aide d'une optique d'émission. Selon la station, cette optique d'émission est constituée par le télescope lui-même ou bien par une lunette annexe. Pour mesurer les distances lointaines (jusqu'à la Lune), on utilise un laser qui génère une source de lumière cohérente extrêmement énergétique et très directive.

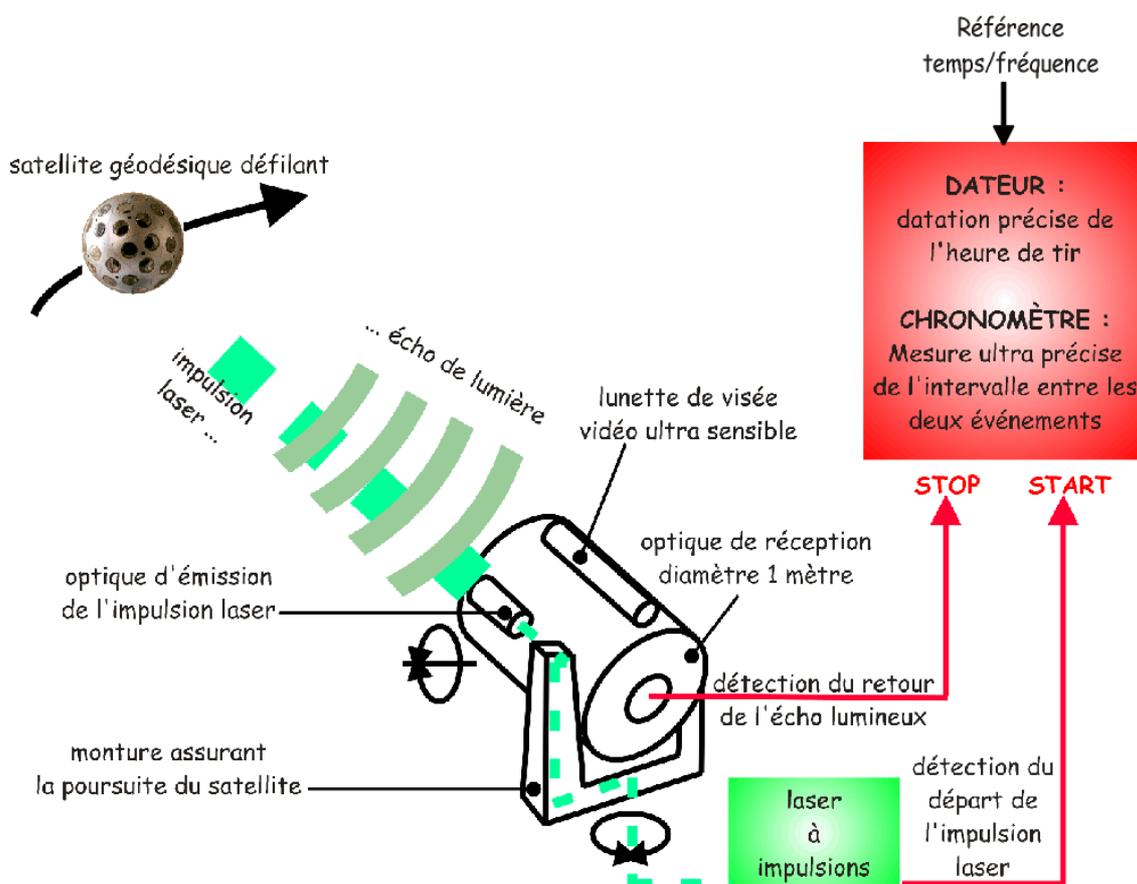


Figure 1.1 : Schéma de principe des observations de télémétrie laser basé sur le fonctionnement de la station laser satellites fixe de l'Observatoire de la Côte d'Azur.

Le départ de l'impulsion laser est daté et le temps de vol aller-retour du faisceau laser entre la station et le satellite est chronométré très précisément. La différence de temps entre l'instant de départ et l'instant de retour constitue la mesure brute. Connaissant ce temps ainsi que la vitesse de propagation de la lumière, on en déduit alors la distance station-cible. Pour obtenir une précision centimétrique des mesures de distances, il est nécessaire de dater le tir laser à quelques 100 ns près et le temps d'aller-retour doit être chronométré à quelques dizaines de picosecondes près.¹

Comme les cibles sont mobiles, la station laser doit disposer d'un système de poursuite dont l'ensemble émetteur/récepteur doit être motorisé et asservi avec une grande précision. Ainsi, la poursuite des satellites est assurée en ayant la capacité de se déplacer rapidement d'un point à l'autre du ciel.

Compte tenu de la mobilité du système de poursuite, il est nécessaire de définir un point de référence des mesures qui soit fixe pour toutes les positions de l'instrument. Le point de croisement des axes du télescope, seul invariant dans la rotation, est un choix judicieux. Cependant, le côté immatérialisable² de ce point rend difficile le rattachement géodésique, même s'il peut être pointé.

¹ Quelques ordres de grandeur : un satellite se déplace à environ 7 km/s soit 7 mm en 10 ns et 10 ps en temps de vol aller-retour correspondent à 1,5 mm en distance.

² Point immatérialisable dans la mesure où il se situe à l'intérieur du tube du télescope.

Nous reviendrons sur l'importance de la détermination précise de la position de ce point lorsque le problème de l'étalonnage sera abordé au cours du Chapitre 2.

Pour résumer, une station au sol de télémétrie laser doit donc comporter principalement :

- un laser pour la production des impulsions lumineuses et une optique d'émission,
- un télescope de poursuite pour recueillir les photons revenant de la cible, télescope ayant une grande mobilité et une bonne qualité de pointage ($<10''$),
- une chaîne de chronométrie et une horloge pour dater les événements et mesurer le temps de vol des impulsions (datation à 100 ns près et chronométrie à environ 30 ps près),
- une référence de temps et de fréquence (asservissement du chronomètre),
- un ou plusieurs photodétecteurs sensibles,
- une station météorologique locale afin de mesurer la température, la pression atmosphérique et le taux d'humidité, données nécessaires à la correction liée à la propagation de la lumière dans l'atmosphère,
- un système d'étalonnage des mesures,
- un ensemble informatique pour le pilotage de la station, l'acquisition des données, leur prétraitement en station et leur envoi vers une base de données internationale commune à l'ensemble des stations de télémétrie laser pour être extraites et traitées par une dizaine de centres d'analyse. L'ensemble des activités d'observations et d'analyse est coordonné dans le cadre de l'ILRS (*International Laser Ranging Service*).

Les éléments fondamentaux d'une station laser sont étudiés en détails et en termes d'exactitude des mesures au cours du Chapitre 2.

1.2. Les différents satellites observés

Une douzaine de satellites sont observés régulièrement par les stations de télémétrie laser, tandis que d'autres satellites sont observés plus ponctuellement lors de campagnes spécifiques. Ils ont des orbites très différentes les unes des autres, avec des distances variant de 350 km à 20 000 km (durée de passage au-dessus de la station comprise entre 5 minutes et plusieurs heures) et des inclinaisons très diverses (voir Figure 1.2). Les mesures sont effectuées en permanence lorsque le ciel est dégagé, de jour comme de nuit, afin d'avoir la meilleure couverture possible des orbites. Une liste des principaux satellites équipés d'au moins un rétro réflecteur laser est donnée dans le Tableau 1.1.

Etant donné le nombre important de satellites à observer, un ordre de priorité est établi par l'ILRS selon les programmes scientifiques associés et les campagnes en cours. A l'avenir, les stations de télémétrie laser seront amenées à disposer d'un système de poursuite capable de passer très rapidement (en moins de 10 s) d'un satellite à un autre.

Pour que la lumière revienne dans le télescope de la station de télémétrie, les cibles observées doivent être équipées de rétro réflecteurs laser (voir Figure 1.3). Ce sont des dispositifs optiques simples, construits en forme de coin de cube, ayant la propriété de réfléchir la lumière dans la direction incidente. Ces rétro réflecteurs sont réalisés avec des précisions angulaires de quelques secondes de degré.

Tableau 1.1 : Principaux satellites équipés de rétroreflecteurs laser. Les missions actuelles sont classées par ordre de priorité d'observation.

- **Mission actuelles**

Satellite	Poids (kg)	Taille de la cible ou du panneau de réflecteurs	Altitude moyenne (km)	Inclinaison (°)	Pays	Domaines d'applications
CHAMP (2000)	400	4x1x1,6m	470	83	Allemagne	Géosciences
GFO-1 (1998)	300	16cm (hémisphère)	835	107,9	USA	Altimétrie
ERS-2 (1995)	2516	20cm (hémisphère)	800	98,6	ESA	Océanographie, altimétrie
TOPEX/POSEIDON (1992)	2400	150cm (couronne)	1350	66	USA, France	Océanographie, altimétrie
SUNSAT (1999)	60	26,4cm (couronne)	650	96,5	Afrique du Sud	Imagerie, communication, observation de la Terre
STARLETTE (1975)	47,25	24cm (sphère)	900	49,8	France	Géodynamique
WESTPAC-1 (1997)	23,5	24cm (sphère)	835	98	WPLTN	Géodynamique
STELLA (1993)	48	24cm (sphère)	815	98,6	France	Géodynamique
BEACON-C (1965)	32	46cmx25cm (octogone)	1000	41,2	USA	Observation de la Terre
AJISAI (1986)	685	214cm (sphère)	1500	50	Japon	Géodynamique
LAGEOS-2 (1992)	405	60cm (sphère)	5800	52,6	USA, Italie	Géodynamique
LAGEOS-1 (1976)	411	60cm (sphère)	5900	109,8	USA	Géodynamique
GLONASS-78 79 80 (1990-98)	1400	1,2x1,2m (plan)	19140	64,8	Russie	Système de navigation russe
GPS-35 36 (1993-94)	930	24x19cm (plan)	20195	54,2	USA	Positionnement
ETALON-1 (1989)	1415	1,3m (sphère)	19100	65,3	Russie	Géodynamique
ETALON-2 (1989)	1415	1,3m (sphère)	19100	65,2	Russie	Géodynamique

- **Missions futures**

Satellite	Poids (kg)	Taille de la cible ou du panneau de réflecteurs	Altitude moyenne (km)	Inclinaison (°)	Pays	Domaines d'applications
ADEOS-2 (2002) Advanced Earth Satellite - II	1200	16cm (hémisphère)	803	98,6	Japon	Observation de la Terre
ALOS (2002)	3750	à définir	720	98	Japon	Observation de la Terre
ATEX (2001)	54		787	85	USA	Physique fondamentale
ENVISAT (2001)	8211	20cm (hémisphère)	800	98,5	ESA	Océanographie, altimétrie
Gravity Probe-B (2002)	3334	9 coins de cubes circulaires	7018	90	USA	Géosciences
ICESAT (2001) GLAS Geoscience Lidar Altimeter System	970	18cm (hémisphère)	600	94	USA	Altimétrie laser
IRS-P5 (2001-2002)		20cm (hémisphère)	617	97,87	Inde	Observation de la Terre
JASON-1 (2001)	500	16cm (hémisphère)	1336	66	USA, France	Océanographie, altimétrie
VCL - Vegetation Canopy Lidar (2001)		18cm (hémisphère)	390	67	USA	Altimétrie, caractérisation 3D de la structure de la Terre

- **Anciennes missions**

Satellite	Poids (kg)	Taille de la cible ou du panneau de réflecteurs	Altitude moyenne (km)	Inclinaison (°)	Pays	Domaines d'applications
ADEOS/RIS (1996)	3500	50cm	815	98,6	Japon	Environnement, atmosphère
BEACON EXPLORER B (1964)			1000	79,7		
DIADEME-1 (D-1C) (1967) *	23	50cm	815	39,9	France	Géodynamique
DIADEME-2 (D-1D) (1967) *	23	50cm	1160	39,5	France	Géodynamique
ERS-1 (1991)	2400	20cm (hémisphère)	780	98,5	ESA	Océanographie, altimétrie
GFZ-1 (1995)	20,6	20cm (sphère)	385	51,6	Allemagne	Champ de gravité, géodynamique
GEOS-1 (1965)			1700	59,4	USA	Observation de la Terre
GEOS-2 (1968)			1320	105,8	USA	Observation de la Terre Plate-forme de test pour comparaison des performances des radars, lasers et techniques de poursuite optique
GEOS-3 (1975)	346	57cm (couronne)	850	115	USA	Champ de gravité, surface des océans
METEOR 2-21/FIZEAU (1993)	1300	3 coins de cube alignés	960	82,6	Russie	Observation de la Terre
METEOR-3 (1991)		28cm (couronne)	1200	82,5	Russie	Observation de la Terre, météorologie
MIR					Russie	Station spatiale russe
MSTI-2 (1994)	170	18cm (hémisphère)	432	97,1	USA	Satellite de test
RESURS-O1-3 (1994)	1950	2 coins de cube alignés	675	97,9	Russie	Observation de la Terre
SEASAT (1978)	2290		800	108	USA	Océanographie
TiPS (Norton et Ralph) (1996)	54	2x18 coins de cubes à chaque extrémité	1030	63,4	USA	Physique fondamentale
ZEIA (1997)	87	28cm (panneau)	480	97,3	Russie	Navigation

* Satellites à nouveau poursuivis dans les années 1990 pour la détermination du champ de gravité.

WPLTN correspond au *Western Pacific Laser Tracking Network*.

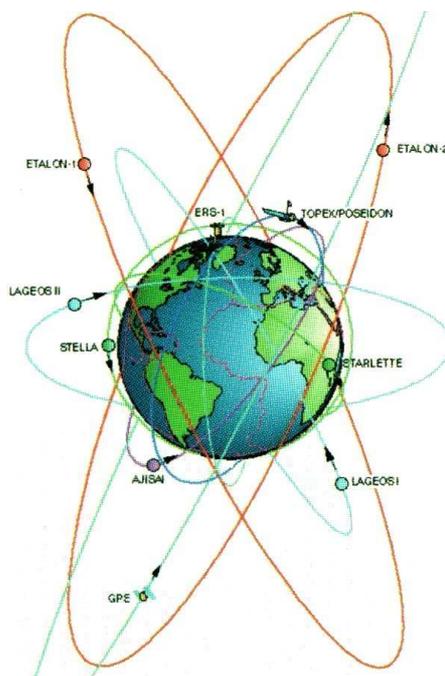


Figure 1.2 : Diversité des orbites des satellites observés par la technique de la télémétrie laser (d'après NASA).

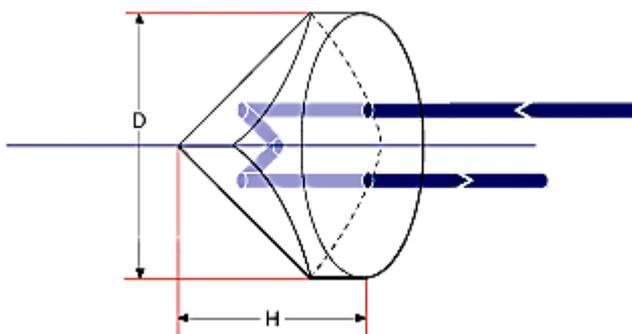


Figure 1.3 : Rétroreflecteur en forme de coin de cube

Différentes sortes de satellites sont observées. Selon le type de satellite et selon son orbite, une grande variété d'applications scientifiques sont abordées, comme nous le verrons en deuxième partie de ce chapitre.

Le premier type correspond à des satellites dédiés exclusivement aux mesures de télémétrie laser comme STELLA, STARLETTE, LAGEOS, AJISAI, GFZ-1 ou ETALON... Il s'agit de satellites entièrement passifs, avec une durée de vie quasi-infinie (pour des orbites d'altitude supérieure à 800 km). Ces satellites, complètement recouverts de rétroreflecteurs laser, sont sphériques et très massifs (voir Figure 1.4). Leur forme sphérique leur permet d'avoir des orbites moins sensibles aux forces non gravitationnelles (freinage atmosphérique, pression de radiation) par comparaison aux autres satellites, munis par exemple de panneaux solaires. Leur masse importante leur permet d'être

bien adaptés à l'étude des grandes longueurs d'onde du champ de gravité terrestre et à leurs variations temporelles.

Le second type correspond à d'autres satellites ayant des formes plus complexes (panneaux solaires, antennes...) comme DIADEME, TOPEX/POSEIDON, ERS, GPS, GLONASS qui ne sont pas uniquement dédiés à la télémétrie laser. Ces satellites sont munis d'un ou plusieurs coins de cube. La prise en compte de la forme du panneau de rétroreflecteurs et de la disposition des coins de cube dans l'analyse des données est indispensable pour atteindre une exactitude centimétrique des mesures (voir Chapitre 2).

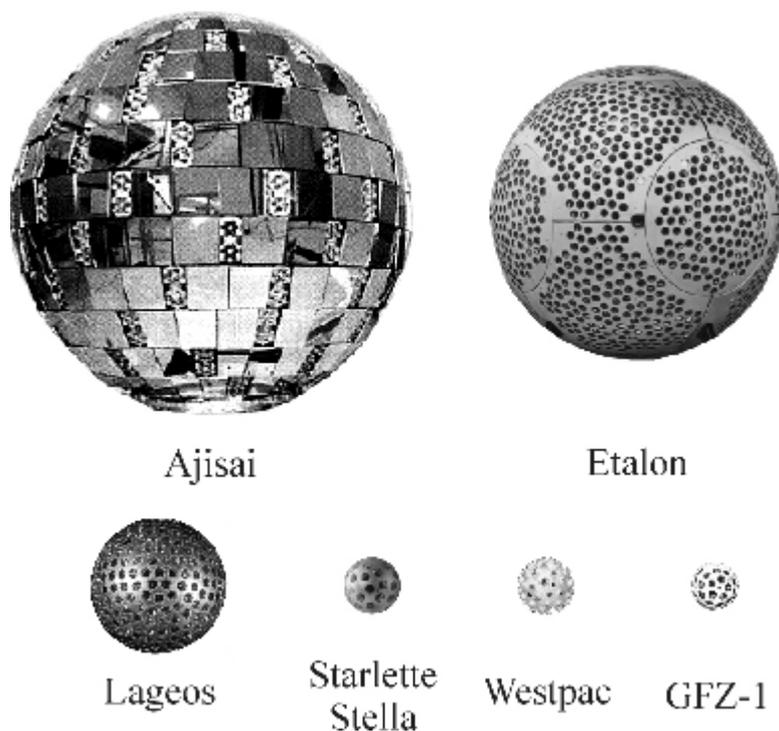


Figure 1.4 : Différents satellites dédiés à la télémétrie laser. Le rapport d'échelle des dimensions des différents satellites est conservé. A titre indicatif, le diamètre du satellite LAGEOS est de 60 cm.

La télémétrie laser concerne également le satellite naturel de la Terre, la Lune : c'est la télémétrie laser Lune (*Lunar Laser Ranging* – LLR). En juillet 1969, les astronautes de la sonde Apollo XI ont déposé le premier panneau de rétroreflecteurs sur la Lune (voir Figure 1.5). Puis, en l'espace de quelques années, quatre autres panneaux ont été placés à la surface lunaire par les missions habitées Apollo XIV et XV (1971) et les sondes automatiques soviétiques Lunakhod I et II (1973).

Les mesures de télémétrie laser Lune sont basées sur le même principe que la télémétrie laser sur satellites, mais la cible considérée est beaucoup plus éloignée (distance Terre-Lune = $3,84 \cdot 10^5$ km). Cette distance importante pose des difficultés supplémentaires. La première concerne le nombre de photons à détecter puisqu'il n'en revient en moyenne dans le télescope qu'un seul par impulsion¹ et on n'en détecte en moyenne que 10%. La seconde difficulté est liée non seulement à distance de la Lune, mais aussi à la rotation de la Terre. En effet, la lumière met environ 1,2 s pour aller jusqu'à la Lune et autant de temps pour en revenir, durée pendant laquelle la Terre a tourné et les photons ne reviennent donc pas exactement au niveau de la station (aberration de vitesse). Pour y remédier, on envoie le

¹ Une impulsion laser compte en moyenne 10^{18} photons.

faisceau laser à l'emplacement où sera la cible au moment de l'arrivée de la lumière et les rétroreflecteurs laser lunaires ne sont pas parfaits (ils ne renvoient pas la lumière tout à fait dans la direction incidente).

Aujourd'hui, la télémétrie laser Lune n'est assurée que par deux stations au monde : celle de l'OCA/CERGA en France et celle de l'observatoire de McDonald aux Etats-Unis. Ce type d'observations a des applications scientifiques bien spécifiques.

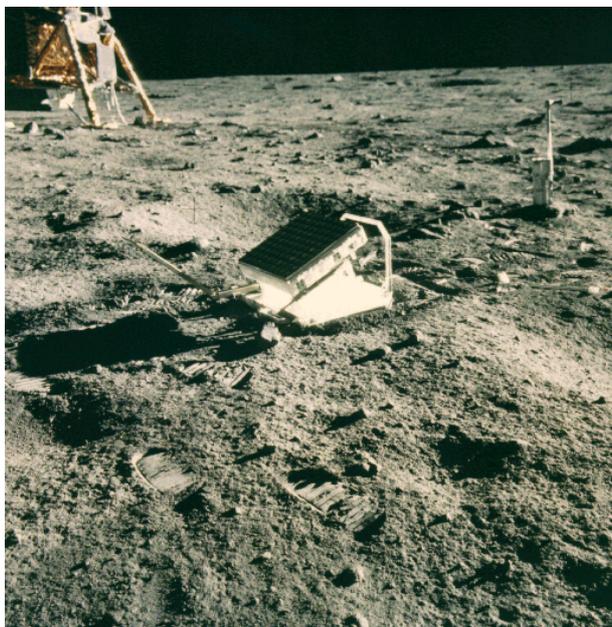


Figure 1.5 : Panneau de rétroreflecteurs laser déposé sur la Lune lors de la mission Apollo XI en 1969 (d'après NASA).

1.3. Le réseau international de stations laser

Comme pour n'importe quel système de géodésie spatiale, une station isolée n'apporte pas suffisamment d'informations pour atteindre les objectifs scientifiques poursuivis. Un réseau de stations à l'échelle planétaire est donc indispensable, ainsi qu'une bonne coordination entre les différentes stations et l'existence d'une base de données.

Le réseau international laser comprend aujourd'hui une quarantaine de stations essentiellement situées dans l'hémisphère Nord (voir Figure 1.6). Elles sont très différentes les unes des autres, à la fois en termes d'instrumentation et de performance. La répartition géographique des stations est liée aux coûts et à la technologie requis pour le développement de tels instruments. Certaines régions restent quasiment inaccessibles aux équipements actuels (zones polaires, océaniques ou désertiques), ce qui laisse donc un large vide dans la répartition des données. Cependant, les progrès réalisés dans la connaissance du champ de gravité et, dans une moindre mesure, ceux réalisés sur la modélisation de la haute atmosphère, diminuent un peu ces contraintes du point de vue de l'orbitographie.

Afin de compenser cette distribution globale non homogène des observations, mais surtout afin d'atteindre un certain nombre d'objectifs scientifiques plus spécifiques, quelques stations mobiles ont été développées par la communauté laser dans les années 1980. D'un poids approximatif de 1 à 3 tonnes et ne se déplaçant en réalité qu'à grands frais, quelques unes de ces stations mobiles sont

encore actuellement en fonctionnement, mais fixes. Parmi celles-ci on peut citer les stations : MOBLAS-8 (*MOBile LASer Ranging System*) à Tahiti, MTLRS-1 (*Modular Transportable Laser Ranging System*) en Allemagne, MTLRS-2 aux Pays-Bas, TLRs (*Transportable Laser Ranging System*) aux Etats-Unis et TIGO (*Transportable Integrated Geodetic Observatory*) en Allemagne [Abele et al., 1994], [Sperber et al., 1996], [Sperber et al., 1994a], [Sperber et al., 1994b]. La Station Laser Ultra Mobile, quant à elle, est de loin la plus petite au monde, pesant en tout seulement 300 kg. D'autres petites stations entièrement automatiques et fixes, sont en développement. A ce propos on peut citer le projet SLR2000 de la NASA ayant pour objectif la construction de plusieurs stations avec un laser non dangereux pour les yeux [Degnan et al., 1996].

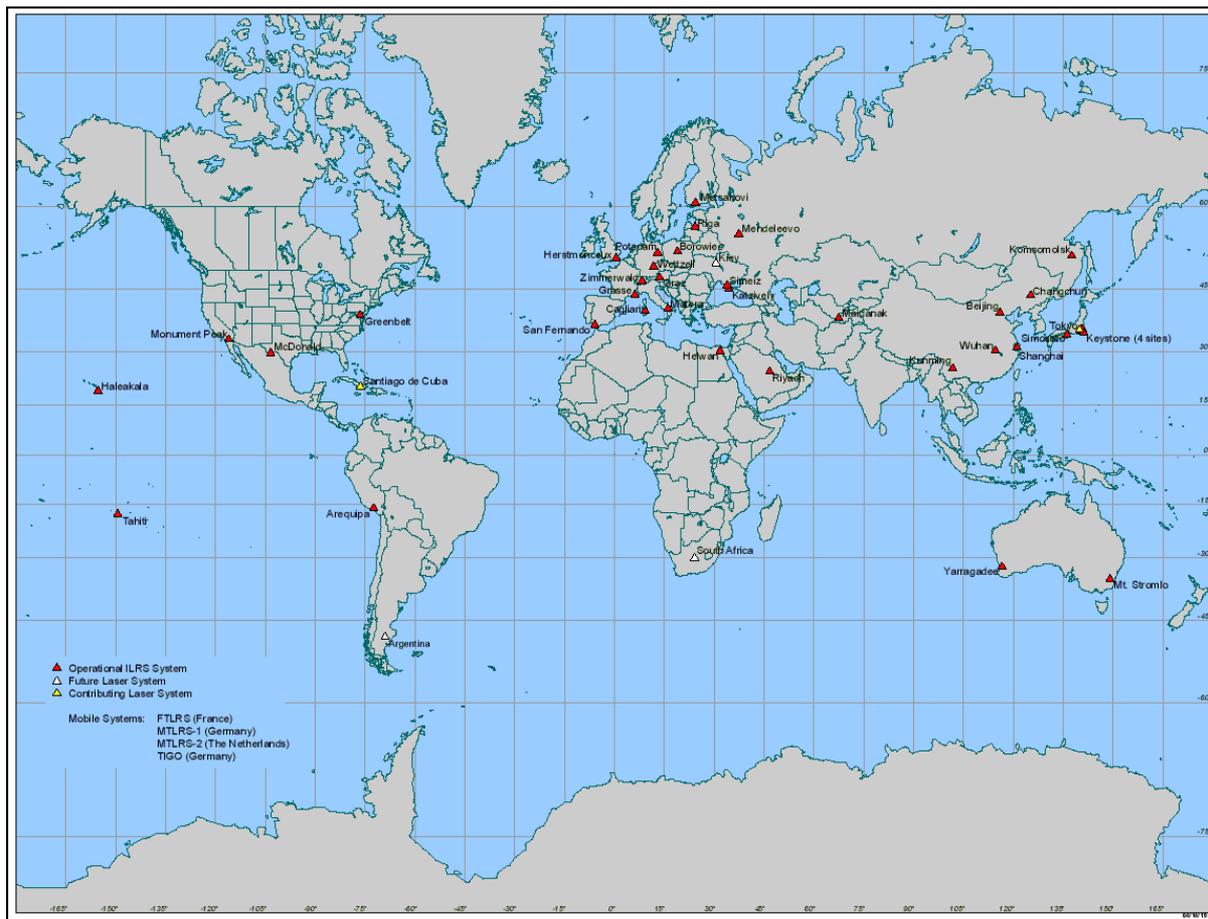


Figure 1.6 : Carte de la répartition géographique des stations laser constituant le réseau international (d'après ILRS).

Les stations du réseau sont de différents types, à la fois en termes de conception et de fonctionnement. Cette diversité apporte certes une richesse liée aux différences de technologie, mais entraîne naturellement des difficultés d'analyse. Il est donc indispensable de disposer d'une très bonne coordination internationale, point sur lequel d'énormes progrès ont été réalisés depuis la création de l'ILRS il y a seulement deux ans [Degnan, 1998b ; ILRS, 1998]. Les objectifs principaux de cet organisme international sont de soutenir les activités de recherche en géodésie et géophysique, en mettant à disposition les données de poursuite de télémétrie laser satellites et laser Lune ainsi que les produits relatifs à ces observations. L'ILRS développe aussi les spécifications et les standards nécessaires tout en encourageant l'adhésion internationale des stations laser à ses conventions. Il s'assure du bon fonctionnement des systèmes de collecte, de fusion et d'archivage des données laser.

Il se charge également d'approuver de nouvelles missions, de dresser la liste des priorités d'observations et de lancer des campagnes d'observations prioritaires en concordance avec des besoins plus ou moins ponctuels, comme récemment pour les satellites GFO puis CHAMP et prochainement pour le satellite JASON-1. L'ILRS transmet également régulièrement aux stations des statistiques sur le nombre de passages observés par satellite par l'ensemble des stations et tous les trimestres une évaluation des performances de chaque instrument. Enfin, l'ILRS s'assure de l'analyse régulière des données à des fins géodynamiques et permet donc le suivi de la qualité des données. Cet organisme joue un rôle essentiel et a notamment permis le développement d'un système de communication en temps réel au cours des observations entre les stations (pour le moment seulement au niveau de l'Europe). Il est important de mentionner que depuis l'existence de l'ILRS, il y a eu une meilleure prise en compte de l'aspect global de la technique laser.

2. Applications en géosciences

Durant les trois dernières décennies, la télémétrie laser a contribué à un large domaine d'applications scientifiques et d'ingénierie, tandis que la précision des mesures a progressé considérablement, passant de quelques mètres à quelques millimètres (voir Figure 1.7). Le rôle de la télémétrie laser dans la détermination des orbites des satellites, dans le positionnement géodésique des stations ainsi que dans la connaissance du champ de gravité terrestre a été depuis longtemps reconnu par la communauté scientifique. Comme la précision de la technique laser s'est améliorée, beaucoup d'opportunités scientifiques se sont présentées d'elles-mêmes. Ainsi, depuis 1964, chaque amélioration technologique a été rapidement suivie de nouvelles perspectives scientifiques. Les mesures laser ont donc permis de :

- définir un repère global de référence terrestre avec une précision moyenne de niveau centimétrique,
- mesurer les mouvements des plaques tectoniques et détecter des déformations crustales régionales près des limites de plaques,
- déterminer les grandes longueurs d'onde du champ de gravité terrestre. La télémétrie laser est la seule technique de géodésie spatiale à pouvoir le faire avec une grande exactitude. Cela concerne notamment la détermination de la constante gravitationnelle géocentrique (GM),
- suivre les variations temporelles du champ de gravité de la Terre, l'orientation et les mouvements de l'axe de rotation, en les reliant aux échanges de moment angulaire et/ou aux redistributions de masses à l'intérieur du système « terre – océan – atmosphère »,
- contribuer à la détermination des effets de marées (océanique et atmosphérique) et à l'étude du niveau absolu des mers et de la circulation océanique avec des altimètres spatiaux,
- participer à l'étalonnage absolu des altimètres radar et leur suivi, afin de contrôler leurs dérives à long terme.

Les observations des satellites LAGEOS-1 et -2 (*L*As*e*r *G*E*O*d*y*n*a*m*i*c*s* *S*at*e*ll*i*t*e*) à 6 000 km d'altitude sont essentielles pour le positionnement. En effet, comme ils sont lointains, leurs orbites sont stables par rapport aux « accidents » du champ de gravité de la Terre et à ceux dus à la densité atmosphérique. Ainsi, les satellites LAGEOS constituent des cibles permettant des mesures géodésiques de haute précision pour le positionnement en trois dimensions des stations, les mouvements des sites d'observation ainsi que les paramètres de rotation de la Terre. Mais ils permettent aussi la détermination des premiers termes du champ de gravité terrestre, y compris leurs variations temporelles. Les satellites ETALON-1 et -2 (20 000 km) servent, quant à eux, à des études de même nature et à observer la rotation de la Terre.

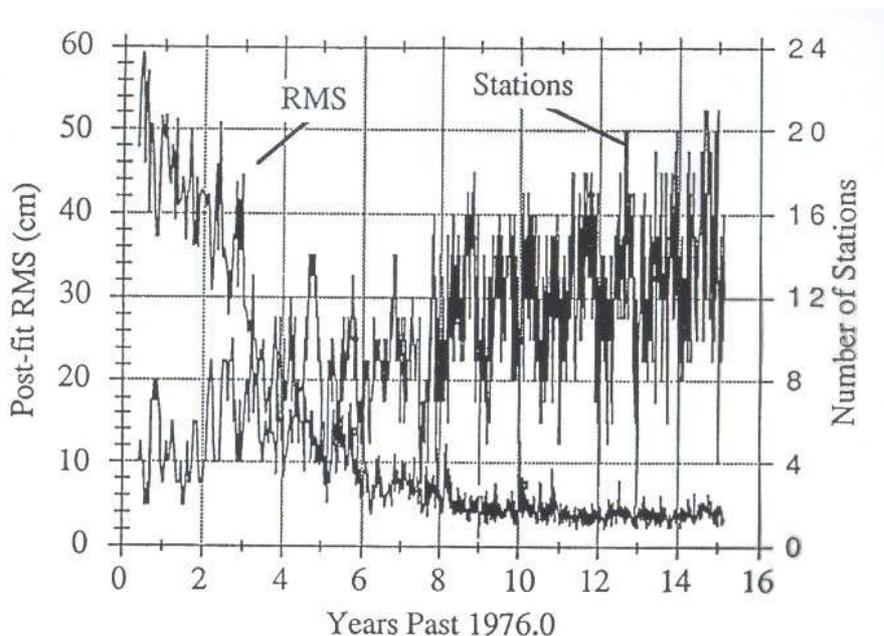


Figure 1.7 : Evolutions parallèles du nombre de stations laser et des résidus laser sur LAGEOS depuis 1976 (d'après la solution NASA SL7.0, 1991).

L'analyse des trajectoires des satellites a permis des études sur la haute atmosphère terrestre [Berger et al., 1998] et sur les forces non gravitationnelles [Métris et al., 1997]. Par exemple, le satellite GFZ-1, qui était situé à 350 km d'altitude¹, était très sensible au freinage atmosphérique et a pu donner accès aux valeurs de la densité atmosphérique à cette altitude [Bruinsma et al., 1999].

Dans la suite, nous détaillons uniquement les applications principales de la télémétrie laser dans lesquelles la Station Laser Ultra Mobile joue et jouera un très grand rôle. Il s'agit de la géodynamique, de l'océanographie spatiale et des expériences de Transfert de Temps par Lien Laser (T2L2).

2.1. Positionnement et géodynamique

Le positionnement géocentrique des stations laser, déterminé à partir d'orbites de satellites, est une des applications des données de télémétrie laser. Cette localisation faite dans un référentiel lié au centre des masses de la Terre atteint une précision de l'ordre du centimètre [Sillard, 1999], [Boucher et al., 1999a].

Les applications directement liées au positionnement sont l'étude de la tectonique globale (dérive des continents, rebond postglaciaire de la croûte), l'établissement de repères de référence et leur liaison avec ceux définis par les systèmes de poursuite GPS, DORIS ou VLBI. Les coordonnées et vitesses tridimensionnelles des observatoires laser constituant le réseau mondial sont régulièrement mises à jour.

La possibilité de suivi géodésique permet de disposer de mesures du comportement de la croûte terrestre et donc de petites déformations du sol à une précision millimétrique sur des distances relativement importantes (quelques centaines kilomètres à quelques milliers de kilomètres). Des

¹ GFZ -1 est retombé sur la Terre en juin 1999.

mesures en continu donnent accès à la cinétique des mouvements de la croûte terrestre intéressant la volcanologie, la sismotectonique et la sismogénèse [Tapley et al., 1993]. Cependant, dans le domaine de la surveillance locale ou régionale, l'utilisation de GPS apparaît plus appropriée car plus aisée à mettre en œuvre.¹

Une détermination parfaite du géoïde² alliée à une bonne connaissance de la topographie mondiale permet d'avoir une connaissance détaillée des structures géophysiques plus ou moins profondes. Ainsi, on a une meilleure compréhension des structures des dorsales océaniques, de la convection à petite échelle, de la formation des bassins sédimentaires et des variations temporelles du champ de gravité. Cela apporte également des informations sur le comportement mécanique (viscosité) du manteau et permet aussi une meilleure compréhension de la cinétique globale actuelle des plaques lithosphériques et une connaissance de leur comportement mécanique.

Concernant la cinématique horizontale, les mesures de télémétrie laser ont permis de détecter (à mieux que 1 mm/an) les différences entre les vitesses actuelles et celles déduites des modèles globaux de synthèse des données géologiques et géomagnétiques (NUVEL-1), ainsi que les déformations intra-plaques. On observe une très bonne corrélation entre les observations de tectonique des plaques issues des données de télémétrie laser et les modèles géologiques basés entre autres sur le paléomagnétisme. Au cours des années 1980, la technique SLR a démontré sa capacité à mesurer des variations de position de stations avec une précision centimétrique. Elle a permis de vérifier avec succès que les plaques tectoniques ont un mouvement constant et que leurs vitesses de déplacement actuelles sont typiquement à quelques pour-cent près égales à leur mouvement moyen à long terme sur des millions d'années, comme le montrent des observations géologiques.

Les interactions entre plaques tectoniques produisent souvent des déplacements locaux complexes. Des études détaillées des déformations régionales de la croûte terrestre ont été menées dans des zones tectoniquement actives avec des stations laser transportables (comme la TLRS-1, la MTLRS-1 et la MTLRS-2) travaillant simultanément avec les stations laser fixes de la région concernée. Les stations transportables américaines et européennes ont participé avec succès à des campagnes destinées à mesurer la tectonique dans le sud de l'Europe (partie du programme WEGENER/MEDLAS) et à mieux comprendre l'ouverture du golfe de la Californie en réalisant des mesures dans le sud-ouest des Etats-Unis et au Mexique. La station mobile japonaise HTLRS, quant à elle, s'est concentrée sur la cartographie des déformations des îles japonaises. Dans le passé, ces stations mobiles, cependant lourdes à déplacer, ont été particulièrement utiles en atteignant les objectifs proposés dans le cadre des programmes de géodynamique [Bosworth et al., 1993 ; Vermaat et al., 1998], comme le *Crustal Dynamics Project*³ de la NASA [Smith et Turcotte, 1993a ; 1993b ; 1993c] et le programme européen WEGENER/MEDLAS [Baldi et Zerbini, 1988]. Ce dernier concerne une étude plus détaillée des processus tectoniques dans la région Europe/Méditerranée en utilisant une combinaison des techniques GPS, laser et VLBI. Mais depuis quelques années, ces études régionales sont désormais poursuivies avec GPS (coût beaucoup plus faible, meilleure mobilité et plus grand potentiel de densification des mesures).

Enfin, l'apport de la technique laser en tant que système de positionnement absolu est extrêmement prometteur pour tenter de mesurer avec une précision de 1-2 mm les mouvements verticaux de la croûte terrestre dont l'amplitude varie selon l'activité des régions considérées. Ces études, actuellement très prospectives, ont des implications importantes dans les sciences de la Terre, notamment pour la formation des chaînes de montagne, l'effondrement tectonique (subsidence) ou les mouvements de surrection à l'échelle continentale, comme le rebond post-glaciaire (soulèvement au niveau de quelques millimètres par an) ou la charge océanique sur les plates-formes continentales. De plus, il est fondamental pour l'étude du niveau moyen des mers de distinguer clairement la part de

¹ Positionnement relatif très précis sur de courtes et moyennes distances.

² Le géoïde correspond à la surface équipotentielle du champ de gravité.

³ Le projet Crustal Dynamics de la NASA (de 1979 à 1991) fut la première étude du mouvement contemporain des plaques tectoniques à une échelle globale. Les objectifs de ce programme comprennent l'étude du mouvement global des plaques tectoniques, de la déformation locale de la croûte, du champ de gravité terrestre et des paramètres d'orientation de la Terre.

soulèvement ou de subsidence de la croûte par rapport à celui du niveau des mers. Il est ainsi nécessaire de mesurer des hauteurs par rapport au centre des masses de la Terre et le mouvement du géocentre par rapport à la croûte terrestre, avec une exactitude proche de quelques millimètres. Aujourd'hui, une telle exactitude ne peut être réellement atteinte avec aucune technologie. La technique de la télémétrie laser pourrait cependant demeurer le bon candidat, voire le meilleur, à long terme.

2.2. *Océanographie spatiale*

Les données laser permettent, de par leur qualité et le nombre d'années d'observations disponibles, d'avoir accès à une meilleure compréhension des phénomènes variables, à caractères saisonnier et séculaire, qui affectent la Terre dans son ensemble, y compris les océans. En effet, la télémétrie laser participe fortement aux missions océanographiques en contribuant à la réalisation d'un repère de référence géocentrique, d'une orbitographie précise et en fournissant des informations sur le géoïde, données de base pour ces expériences [Biancale et al., 2000], [Nouël et al., 1994], [Tapley et al., 1993].

En océanographie spatiale, l'objectif des missions altimétriques comme TOPEX/POSEIDON (T/P), ERS, JASON-1 et ENVISAT est de mesurer la topographie de la surface des océans et le signal océanique. Ce dernier peut être défini comme la différence entre la hauteur de mer et le géoïde. L'étude du niveau des océans donne aussi accès à la circulation océanique, aux marées et au relief sous-marin. En moyennant au cours du temps la surface topographique mesurée et en corrigeant au mieux les effets océaniques, on obtient une surface moyenne des océans. Cette surface contient le signal du géoïde marin et la composante de la topographie dynamique (courants).

L'altimétrie spatiale, à partir d'un satellite dont l'orbite est connue avec une grande précision permet de mesurer la distance entre le satellite et la surface marine à l'aide d'un radar pointé au nadir et d'en déduire la topographie instantanée de la surface des océans. En réalisant des séries temporelles de la surface moyenne des océans, on peut estimer l'élévation moyenne du niveau des mers sur les huit dernières années à environ $0,8 \pm 0,2$ mm/an en accord avec de précédentes estimations de 1-2 mm/an à partir de nombreuses années (entre 50 et 100 ans) de mesures marégraphiques globales [Wöppelman, 1997], [Cazenave et al., 1999], [Barlier et al., 1996], [Mitchum, 1994]. De larges phénomènes transitoires comme la propagation d'ondes (par exemple ondes de Rossby) ou les tourbillons de moyenne échelle peuvent également être mis en évidence dans les mesures altimétriques.

Les données laser participent plus particulièrement à la détermination et à la validation des orbites précises des satellites océanographiques ainsi qu'à l'étalonnage au cours du temps des altimètres radar embarqués. Ce genre d'activités constituait, il y a quelques années, une des principales motivations du développement de la Station Laser Ultra Mobile.

En fournissant des mesures sur les satellites altimétriques comme ERS-1 et -2 ainsi que T/P, la télémétrie laser contribue, avec les autres systèmes radioélectriques embarqués, à la détermination d'orbites précises à quelques centimètres près à partir desquelles des effets océaniques comme la circulation océanique globale ou l'élévation du niveau moyen des mers ont pu être évalués et étudiés. Connaissant le géoïde par ailleurs (mesures spatiales ou locales), on en déduit des paramètres océanographiques essentiels à l'étude des bilans globaux de la Terre.

Ces programmes (voir Tableau 1.2) ont connu un essor très important en raison de l'intérêt porté aux résultats de la recherche océanographique et de ses liens avec la météorologie et la climatologie (température, courants océaniques, évolution des climats, niveaux des océans et des calottes polaires, cartographie des fonds marins, instabilités comme El Niño, etc.). L'évolution de zones comme la Méditerranée est particulièrement concernée par ces études en raison des implications climatiques régionales [Larnicol et al., 1995], [Ayoub, 1997] et la disponibilité des mesures in situ relativement nombreuses donne la possibilité de mener des études comparatives entre toutes les sources de données

(marégraphes, altimètre, télémétrie laser, systèmes de poursuite radioélectriques). Pour atteindre des effets dont la variabilité relative est de l'ordre de quelques millimètres par an, de longues séries d'observation en continu sont nécessaires.

Tableau 1.2 : Résumé de 25 ans de missions altimétriques. Erreur radiale d'orbite prévue, précision de l'altimètre embarqué, erreur radiale d'orbite obtenue (avec, entre parenthèses, les meilleurs résultats obtenus), et technique laser comme technique de poursuite unique (suite à une défaillance de l'autre système de poursuite) (**) ou non (*). D'après [Exertier, 2000].

Missions	Laser	Dates	Err. rad. d'orb. prévue (cm)	Précis. altim. (cm)	Err. radiale d'orb. observée (cm)
GEOS-3	*	1975-78	200	15	100
Seasat	*	1978	200	9	75 (20)
Geosat	*	1985-89	100	7	40 (15)
ERS-1	**	1991-00	20	4	20 (3-4)
T/P	*	1992-	12-13	3-4	4 (2-3)
GFO	**	1998-	5	4	10-15
ERS-2	*	1995-	15	4	6
Jason-1	*	2001-	<4	2,5	objectif : 1
EnviSat	*	2001-	10	3-4	objectif : 3

On peut donc résumer le rôle de la télémétrie laser en océanographie spatiale de la manière suivante :

- en poursuivant LAGEOS-1 et -2, la télémétrie laser mesure le déplacement des stations avec une exactitude centimétrique dans un repère de référence géocentrique,
- la combinaison des positions de stations et des temps de vol précis fournis par la télémétrie laser permet de déterminer conjointement aux techniques radioélectriques des éphémérides orbitales pour l'altimètre par rapport au centre des masses de la Terre avec une précision centimétrique,
- la poursuite de toute la constellation des satellites de télémétrie laser fournit les composantes à grandes et moyennes longueurs d'onde du champ de gravité et le géoïde,
- l'étalonnage des altimètres.

ETALONNAGE DES ALTIMETRES SPATIAUX

La mesure brute de la hauteur à laquelle se trouve le satellite au-dessus de la surface des mers peut être entachée d'une erreur constante, qui ne peut être éliminée que par des observations très précises de leur orbite par télémétrie laser. Ainsi, le problème d'étalonnage du radar embarqué est prédominant en altimétrie [Francis, 1992 ; Ménard et al., 1994]. Sa dérive éventuelle dans le temps, due à un vieillissement de l'électronique, est également à prendre en compte pour l'étude de la variation séculaire du niveau des mers. L'expérience de la mission T/P montre qu'il est indispensable de suivre cet étalonnage à un niveau de 1 mm/an sur toutes les années de la mission.

Le principe de l'étalonnage d'un altimètre radar embarqué par la télémétrie laser est illustré par le schéma de la Figure 1.8. Il s'agit de comparer deux mesures indépendantes de hauteur de mer. La première est déduite de la mesure altimétrique. Pour la seconde, on utilise une orbite de référence fournissant la position du satellite, et donc l'altitude de l'altimètre. On utilise ensuite des mesures marégraphiques locales fournissant la hauteur de mer dans le même référentiel que l'orbite. Les rattachements géodésiques nécessaires sont faits avec du matériel de nivellement et par GPS. La comparaison des hauteurs de mer fournies par le segment spatial et le segment sol donne la valeur de l'étalonnage de l'altimètre.

Le marégraphe doit être placé le plus près possible de l'aplomb de la mesure altimétrique, donc de la trace du satellite (10-20 km) et la pente des profils altimétriques, donc du géoïde, ne doit pas être trop prononcée. La configuration optimale serait celle d'une île isolée, car si elle n'est pas trop grande (quelques km²), la présence du sol perturbe peu la mesure altimétrique, même si elle se trouve sous la trace du satellite. Malheureusement, pour des raisons pratiques de logistique et de coût, on utilise des solutions approchantes comme en Corse à Senetosa, à Lampedusa ou sur la plate-forme d'Harvest aux Etats-Unis [Christensen et al., 1994]. Ainsi, une station laser située sur une île, près de la verticale du passage du satellite apporte une information sur la composante radiale d'orbite et donc sur l'altitude du satellite. Le fait de placer la station laser à la verticale, ou presque, du satellite altimétrique permet de réduire les erreurs d'orbite et d'augmenter la précision de la détermination de l'altitude du satellite, donnée prépondérante pour la détermination des hauteurs de mer.

La mesure laser, réalisée dans une gamme de longueurs d'onde (vert ou infrarouge) insensible ou moins sensibles aux problèmes délicats de propagation des signaux dus à l'ionosphère et à la vapeur d'eau, est fondamentale dans cet aspect d'étalonnage. En effet, la télémétrie laser étant moins sensible aux délais de propagation introduits par la vapeur d'eau et complètement insensible à l'ionosphère, cette technique est adaptée à une détermination exacte de l'orbite, surtout pour la composante radiale, et convient donc à l'étalonnage des altimètres embarqués. On corrige les dérives à long terme des biais de toute la chaîne de mesures, et notamment de l'altimètre qui pourraient facilement être interprétées comme des changements du niveau des océans. Cependant, il n'est pas aisé de déterminer des dérives de l'ordre du mm/an.

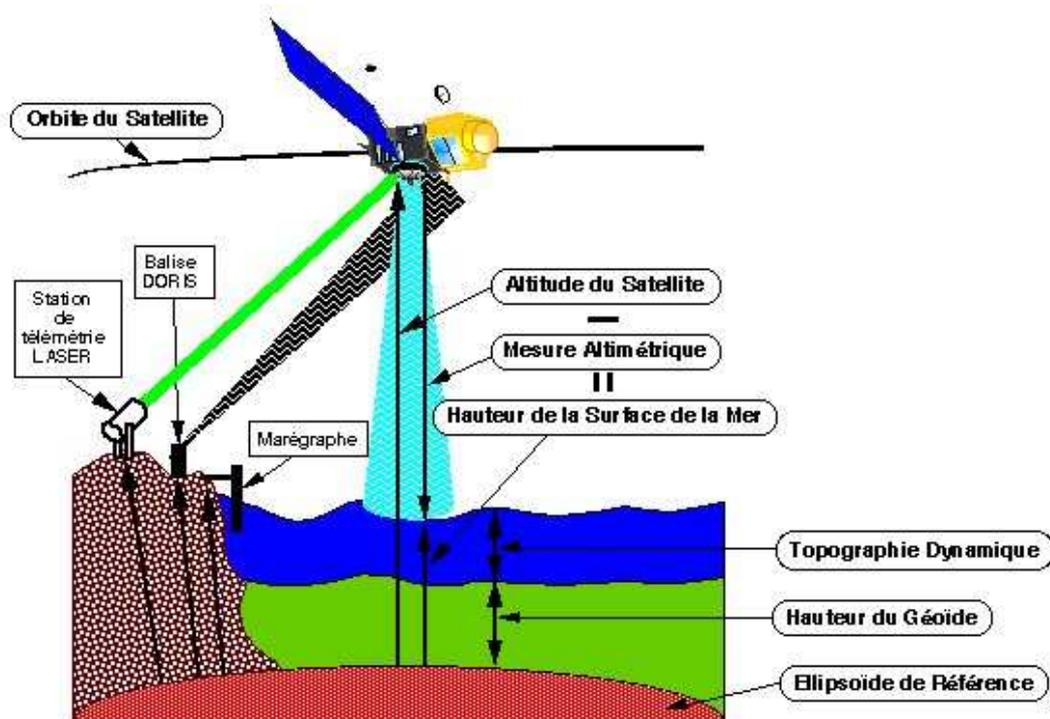


Figure 1.8 : Schéma de principe de l'étalonnage d'un altimètre radar embarqué sur un satellite océanographique par une station de télémétrie laser [Bonnefond, 1994].

L'étalonnage des altimètres radar embarqués est un point crucial pour toutes les études qui découlent des mesures des satellites océanographiques. Dans le cas des missions T/P et JASON-1, il sera fondamental pour rattacher les nouvelles observations de JASON-1 à celles de T/P par des mesures fiables. Ces deux satellites seront placés sur une orbite identique, et leurs passages au-dessus d'une même station d'observation ne seront séparés que de quelques minutes. L'orbite identique des deux satellites pendant les trois premiers mois est destinée à faire un étalonnage croisé des deux systèmes (d'où également la continuité des mesures), mais une fois cet étalonnage réalisé, l'intérêt d'une orbite identique peut se discuter (T/P devrait être positionné sur une autre orbite).

Du point de vue scientifique, la Méditerranée occidentale est devenue une zone d'étalonnage et d'expérimentation très importante dans le monde, compte tenu de sa variabilité océanique relativement faible en tant que mer quasi-fermée. C'est dans ce contexte qu'a été réalisée l'expérience probatoire de terrain avec la Station Laser Ultra Mobile mentionnée dans l'introduction. Pour plus de détails concernant cette campagne et ses résultats, le lecteur est invité à consulter le travail de [Stoufs, 1997] ainsi que l'article [Nicolas et al., 1998] fourni en Annexe E.

ORBITOGRAPHIE DE PRECISION

Outre les aspects orbitographie locale et étalonnage, la télémétrie laser joue un rôle important dans la validation des orbites au niveau global. En effet, une limitation importante du système altimétrique provient de la qualité du calcul d'orbite qui conditionne entièrement la précision avec laquelle on détermine le niveau de la mer. Pour cela, l'utilisation simultanée de systèmes globaux de poursuite de satellites, comme la télémétrie laser, DORIS et GPS, est nécessaire pour assurer une bonne couverture de l'orbite par les données [Nouël et al., 1994]. Cependant, là encore, l'information laser est plus riche et plus contraignante que celle provenant des mesures Doppler ne donnant que l'équivalent d'une

différence de distances. En Méditerranée par exemple, l'apport de la technique laser, et en particulier les données de la station de Grasse à proximité des côtes, a été important pour la détermination des variations saisonnière et séculaire de son niveau moyen, respectivement de 10-15 cm et de 8 mm/an [Bonfond et al., 1995], [Exertier et al., 1996], [Cazenave et al., 1999].

La technique laser est un acteur majeur dans les études de la topographie de surface des océans et des glaces en contribuant à la détermination précise des orbites des satellites altimétriques. Ainsi, pour JASON-1, les systèmes DORIS et GPS sont nominaux pour les orbites et les mesures laser servent pour la validation et le contrôle des orbites ainsi qu'à l'étalonnage de l'altimètre. Les rétroreflecteurs laser sont également un moyen de secours en cas de défaillance des autres systèmes de poursuite embarqués. Par exemple, en dépit de la panne du système PRARE à bord d'ERS-1, les orbites ont été maintenues à un niveau inférieur au décimètre (sur la composante radiale) durant toute sa vie opérationnelle avec le seul support du réseau laser¹ [Scharroo et Visser, 1998]. En utilisant une combinaison de jeux de données laser et DORIS ainsi que le modèle du champ de gravité JGM-3, les orbites de T/P ont une exactitude meilleure que 3 cm sur la composante radiale, ce qui surpasse largement les recommandations initiales de la mission, à savoir 13 cm [JPL, 1991]. L'objectif pour JASON-1 est d'atteindre une orbitographie au niveau de 1 cm pour la composante radiale grâce aux progrès techniques réalisés sur la télémétrie laser et sur DORIS.

2.3. Transfert de temps

Parmi les différentes expériences impliquant une station de télémétrie laser de haute précision, figure en bonne place le transfert de temps. Un premier test de transfert de temps intercontinental a été mené avec succès au travers de l'expérience LASSO (*Laser Synchronisation from Stationary Orbit*) embarquée à bord du satellite METEOSAT P2 de 1988 à 1992 [Fridelance, 1994]. Il s'agit de synchroniser des horloges atomiques spatiales et terrestres situées à plusieurs milliers de kilomètres les unes des autres. Ce type d'expérience se situe à la frontière de la télémétrie laser et de la métrologie du temps et des fréquences.

L'expérience de Transfert de Temps par Lien Laser ou T2L2 (voir Figure 1.9) constitue une nouvelle approche dans laquelle une station comme la FTLRS pourra jouer un grand rôle [Fridelance et al., 1997 ; Samain et Fridelance, 1998]. Elle est basée sur la propagation d'impulsions lumineuses entre des stations laser au sol et un satellite. On doit disposer d'un satellite à bord duquel sont embarqués un système de détection-datation des impulsions lumineuses, une horloge et un panneau de rétroreflecteurs, ainsi que d'une station laser connectée à une horloge terrestre. La station laser émet des impulsions lumineuses très brèves en direction du satellite et les reçoit après réflexion sur le panneau de rétroreflecteurs. Pour chaque impulsion lumineuse émise, les dates de départ et de retour sont enregistrées dans le référentiel de l'horloge terrestre et la date d'arrivée à bord du satellite est enregistrée dans le référentiel de l'horloge spatiale. Après un transfert de données en temps différé des dates enregistrées à bord du satellite, le décalage entre l'horloge spatiale et l'horloge du laboratoire est calculé. L'objectif visé est de réaliser ce transfert de temps avec une exactitude de l'ordre de 50 ps et une stabilité temporelle meilleure que 1 ps sur 1 000 s d'intégration, soit une amélioration de plus d'un ordre de grandeur par rapport aux techniques actuelles. Si plusieurs laboratoires effectuent cette expérience simultanément, il est alors possible de déduire le décalage entre les différentes horloges avec le même niveau de performance.

Cette expérience de transfert de temps a été sélectionnée dans le cadre du projet ACES pour être embarquée en 2004 à bord de la Station Spatiale Internationale (voir Figure 1.10) [Veillet et Salomon, 1996]. ACES (*Atomic Clock Ensemble in Space*) est un projet qui regroupera à bord de la SSI deux horloges ultra stables, un équipement de transfert de temps radio, un équipement de Transfert de Temps par Lien Laser T2L2 et un système de comparaison interne des horloges. L'altitude de la station sera de l'ordre de 400 km et l'inclinaison de l'orbite de 51,6°. L'une des deux horloges sera un maser à hydrogène et l'autre une horloge à atomes froids : PHARAO (Projet d'Horloge par

¹ Les données de l'altimètre embarqué ont également été utilisées.

Refroidissement d'Atomes en Orbite). Cette dernière utilise dans son principe l'avantage des conditions de micro gravité de la Station Spatiale. Elle fait partie des dernières générations d'horloges ultra stables et devrait être la meilleure du monde avec des stabilités et des exactitudes en fréquence attendues dans l'espace à l'échelle de 10^{-16} (une milliseconde sur un million d'années). T2L2 permettra de transporter l'information temporelle de ces horloges ultra stables vers la Terre et réciproquement, sans en dégrader les performances.

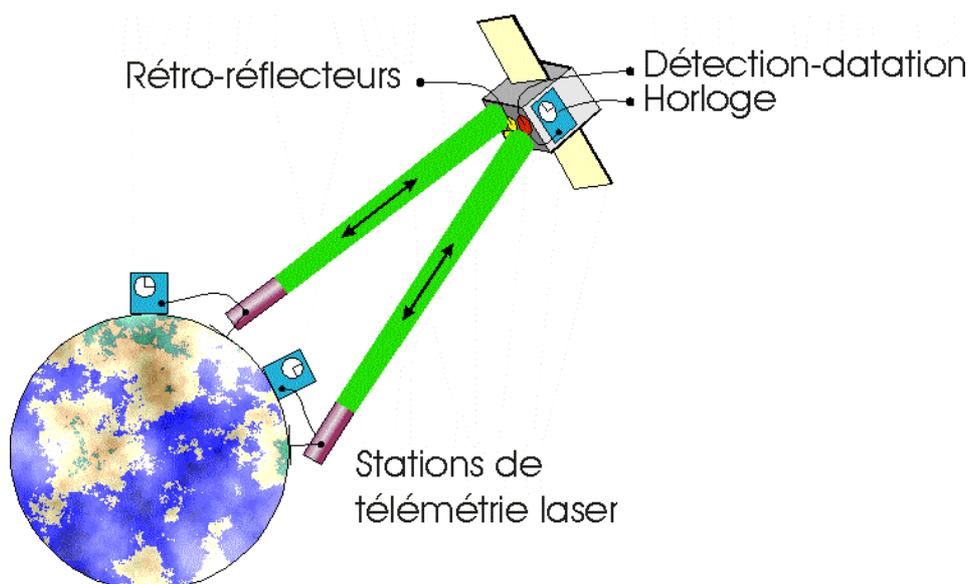


Figure 1.9 : Principe du Transfert de Temps par Lien Laser (d'après Samain).



Figure 1.10 : Vue d'artiste de la Station Spatiale Internationale (SSI) telle que prévue en 2004 (d'après NASA).

Un tel projet a de nombreuses applications à la fois scientifiques et commerciales, dans la diffusion mondiale des échelles de temps, la navigation, les télécommunications, sans oublier les expériences de physique fondamentale sur la nature de la propagation de la lumière [Fridelance, 1997]. T2L2 permettra de synchroniser des horloges éloignées et de mesurer leur stabilité sur des distances de quelques milliers de kilomètres. Ceci est très important dans la mesure où l'utilisation des horloges ultra stables actuelles et futures n'a de sens que si l'on est capable de distribuer et de disséminer leurs signaux. Des applications en physique fondamentale pourront également être réalisées en mesurant l'isotropie de la vitesse de la lumière et en testant des horloges ultra stables en développement. Dans le futur, des horloges comme PHARAO en orbite terrestre pourraient devenir la référence mondiale du temps et T2L2 une technique de distribution utilisée pour synchroniser les horloges terrestres sur l'horloge spatiale.

T2L2 permettra aussi la validation des performances des nouvelles générations d'horloges, aussi bien spatiales que terrestres, la seule méthode permettant de vérifier les performances d'une telle horloge étant la comparaison avec une horloge de meilleure qualité ou tout au moins de qualité équivalente. T2L2 permettra cette comparaison, aussi bien pour des horloges fixes terrestres comme les étalons primaires, que pour les horloges spatiales, et de les raccorder à des services horaires de grande précision. On peut souligner que la réelle mobilité de la FTLRS sera un outil majeur pour pouvoir être installée à proximité de ces centres où tout autre système plus lourd ne serait pas envisageable.

De plus, T2L2 autorisera des études sur la turbulence atmosphérique par l'analyse de la variation des niveaux des impulsions laser, ainsi qu'une amélioration de la sensibilité des mesures VLBI par une synchronisation temporelle des masers à hydrogène, qui permettra une bien meilleure décorrélation des paramètres.

Ces horloges ultra stables associées à T2L2 permettront aussi d'étudier certains aspects de la gravitation comme le paramètre caractérisant l'universalité du décalage gravitationnel vers le rouge, paramètre très important pour discriminer les théories de la gravitation.

A plus long terme, ces horloges spatiales et T2L2 pourront être utilisés pour réaliser de la télémétrie laser unidirectionnelle à l'échelle du Système Solaire. On envisage une exactitude des mesures meilleure que le mètre sur des distances telles que la distance Terre-Mars (environ 300 millions de kilomètres). De tels projets permettraient également de mesurer l'allongement relativiste de la durée du parcours de la lumière au voisinage d'une masse importante comme le Soleil.

3. Intérêt de l'association des différentes techniques de géodésie spatiale

Il existe dorénavant de nombreuses techniques de géodésie spatiale. En effet, outre la télémétrie laser, il faut considérer les systèmes de poursuite radioélectriques et d'autres types de mesures au sol comme la gravimétrie ou la clinométrie ne sont pas à oublier.

Le rôle de la télémétrie laser a changé dès le développement de la technique GPS [Argus et Heflin, 1995] et des systèmes DORIS [Cazenave et al., 1993 ; Crétaux et al., 1998] puis PRARE. Ces développements ont été à l'origine d'importants résultats et d'une révolution dans le domaine des systèmes de référence (mouvements tectoniques des plaques et déformation crustale). Cette compétition avec les techniques radioélectriques et la volonté de relever le « défi centimétrique » de JASON-1 ont stimulé une réorganisation de la télémétrie laser ; les principaux objectifs étant une amélioration en exactitude, une meilleure organisation internationale et un contrôle continu des biais de station.

Les nombreuses activités des dernières décennies se sont concentrées sur l'amélioration des performances des systèmes de poursuite de satellites comme la télémétrie laser (SLR), GPS, DORIS, PRARE et l'observation de quasars (VLBI). Toutes ces techniques sont complémentaires et ont une précision proche l'une de l'autre de l'ordre du centimètre en termes de positionnement, selon leurs conditions d'utilisation [Herring et Pearlman, 1993], [Boucher et al., 1999b]. Un résumé du principe

général de fonctionnement des différentes techniques au sol de géodésie spatiale, autres que la télémétrie laser, est fourni dans l'Annexe A.

La comparaison des techniques spatiales utilisées pour le positionnement, qui ont leurs propres systématismes et leur propre distribution spatio-temporelle des observations, est un point très important. En effet, chacune des différentes technologies de géodésie spatiale a certaines propriétés fortes ainsi que des capacités propres qui se recoupent à différents niveaux. L'existence de différentes technologies permet de mieux interpréter les différentes observations. Ainsi, une seule technique de géodésie n'apporte pas toujours une décorrélation très nette entre des effets dont l'amplitude de la signature géométrique se situe de 1 à quelques mm/an seulement. Afin de combiner directement les résultats des différentes méthodes, il est d'abord nécessaire d'établir la compatibilité des repères de référence et d'avoir des niveaux de performance équivalents.

La précision du positionnement géodésique global obtenu par différentes techniques est indiqué dans le Tableau 1.3 d'après l'ITRF97.

Tableau 1.3 : Comparaison des précisions moyennes en position et en vitesse pour les différentes solutions utilisées dans ITRF97.

Technique	Nombre de solutions utilisées	Précision moyenne des positions (mm)	Précision moyenne des vitesses (mm/an)
Laser	5	10 ± 6	2 ± 1
GPS	4	4 ± 3	2 ± 2
DORIS	6	29 ± 3	9 ± 3
VLBI	3	4 ± 1	1 ± 0,2
Laser + DORIS	1	11 ± 1	4 ± 1

Les techniques spatiales ont une qualité de positionnement de l'ordre du centimètre, sauf la technique DORIS dont la cohérence avec les autres techniques avoisine les 2 cm [Sillard, 1999]. Les vitesses linéaires de déplacement sont déterminées avec une précision de l'ordre de 3 mm/an, sauf pour DORIS (de l'ordre de 9 mm/an). Les différences entre DORIS et les autres techniques peuvent s'expliquer par le petit nombre de satellites équipés du système DORIS. Par ailleurs, l'objectif premier de ce système n'est pas le positionnement précis mais l'orbitographie, domaine pour lequel ce système fournit des résultats remarquables. La faiblesse en positionnement est largement compensée par la qualité du réseau et devrait s'estomper avec la nouvelle génération d'appareillage planifiée avec les lancements des satellites JASON-1 et SPOT-5 (2001).

L'utilisation de nombreuses techniques différentes rassemblées en un même point continue d'être un facteur clé dans l'amélioration de l'exactitude générale des études de géodésie spatiale. Ces expériences de co-localisation permettent en effet de comparer le comportement de différents instruments et de détecter d'éventuels biais, erreurs systématiques ou dérives. La réalisation de co-localisations est donc un point essentiel dans la recherche de meilleures performances. Très souvent, les différentes techniques sont utilisées simultanément comme par exemple en océanographie. Ainsi, les orbites de TOPEX/POSEIDON sont calculées en utilisant des données complémentaires de SLR et DORIS, et aussi parfois de GPS [Perosanz et al., 1997]. Le même système

d'orbitographie est prévu pour JASON-1 (successeur de T/P qui sera lancé en 2001). Tandis que les orbites de ERS-1 (*European Remote sensing Satellite*), lancé en 1991, sont basées uniquement sur les mesures laser, celles de ERS-2 (lancé en 1993) sont obtenues par une combinaison des données laser et PRARE. Quant à ENVISAT (successeur d'ERS-2), qui sera lancé courant 2001, les orbites seront déterminées avec les observations laser et DORIS. D'autre part, les différentes propriétés des techniques de géodésie spatiale montrent actuellement que chaque technique est plus adaptée à telle ou telle application : GPS pour les positionnements locaux et régionaux, VLBI pour définir l'orientation de la Terre dans un système inertiel, DORIS et PRARE pour la détermination rapide d'orbite précise et la télémétrie laser pour la définition du facteur d'échelle¹.

Les expériences de co-localisation servent également à étalonner les différentes techniques entre elles. Le principe de cet étalonnage est basé sur l'observation du même satellite par au moins deux techniques indépendantes au moyen de stations proches l'une de l'autre. Afin que cet étalonnage soit valable, il doit remplir un certain nombre de conditions. Tout d'abord, les observations doivent avoir le même niveau de précision et d'exactitude. Elles doivent également avoir été générées simultanément ou quasi-simultanément, de manière à éviter des incertitudes liées à des décalages ou des dérives temporelles. Enfin, les points de référence de chaque système doivent être bien définis, stables et, ce qui est plus important, bien déterminés et connus en termes de coordonnées. Ainsi, les mesures de distance des différents systèmes peuvent être comparées les unes aux autres et les biais systématiques détectés.

L'Observatoire de la Côte d'Azur, et plus particulièrement le plateau de Calern, joue dans ce contexte un rôle important en géodynamique. La diversité des instruments permanents et leurs observations en continu, complétées par des campagnes géodésiques permettent de lui attribuer le qualificatif d'observatoire géodésique fondamental. L'Observatoire de Calern est ainsi un point de référence unique en France, aussi bien pour son exactitude (10-12 mm d'incertitude par rapport au centre des masses de la Terre) que par la présence de plusieurs techniques dont les résultats sont ensuite comparés. Le plateau de Calern est équipé d'un récepteur GPS scientifique permanent, des stations de télémétrie laser satellites et laser Lune. La FTLRS y est actuellement pour sa phase d'amélioration. Les mesures géodésiques permanentes sont également régulièrement complétées par des mesures du gravimètre absolu transportable FG5 et par des campagnes d'observations GLONASS, DORIS et VLBI. L'opportunité de disposer d'un tel équipement a été exploitée au cours d'une expérience de co-localisation décrite dans le troisième chapitre de cette thèse.

FORCES ET FAIBLESSES DE LA TELEMETRIE LASER

La technique de la télémétrie laser offre de nombreux avantages par rapport aux autres systèmes de géodésie spatiale, mais présente aussi des inconvénients. Les forces et les faiblesses de la télémétrie laser seront exposées dans cette partie en comparaison aux autres techniques. Une comparaison des performances en positionnement sera également donnée.

Tout d'abord, un avantage considérable de cette technique par rapport aux techniques radioélectriques est son absence totale de sensibilité à l'ionosphère². Sa moins grande sensibilité à la composante humide de la correction de propagation atmosphérique est également une force de la télémétrie laser. En effet, cette technique utilise une gamme de longueurs d'onde (vert ou infrarouge) moins sensible aux problèmes délicats de propagation des signaux dus à la vapeur d'eau. Aussi, les mesures laser sont incomparables dans les aspects de positionnement vertical où les techniques micro-onde comme GPS y trouvent une limitation importante (de l'ordre de 12 mm actuellement).

¹ L'échelle en orbitographie est définie essentiellement par la constante gravitationnelle géocentrique GM (3^{ème} loi de Kepler) qui est déterminée à partir des observations laser des satellites LAGEOS, STELLA et STARLETTE.

² Les techniques radioélectriques utilisent deux fréquences d'émission afin de corriger des effets de l'ionosphère.

Cependant, le problème de la correction liée à la composante sèche de la troposphère (pression atmosphérique) est une source résiduelle encore importante de bruit dans les mesures laser (erreur d'environ 1 cm), mais aussi dans les mesures radioélectriques [Degnan, 1993 ; Pelloquin, 1997]. Cet effet se moyenne en partie sur de nombreuses mesures et des améliorations du modèle de correction de propagation dans l'atmosphère ainsi que de nouvelles solutions techniques sont en développement, comme la télémétrie laser deux couleurs [Bianco et al., 1998], [Boër et Hessels, 1998], [Lucchini, 1995]. Ce problème crucial de l'atmosphère sera abordé plus en détails dans le Chapitre 2.

Le caractère unique de la télémétrie laser peut être résumé ainsi :

- cibles spatiales complètement passives ayant une durée de vie quasiment infinie (aucune consommation d'énergie, pas de panne possible),
- coût modique de l'équipement à embarquer à bord des satellites,
- cibles à différentes altitudes et inclinaisons,
- erreurs de modèle de l'indice de réfraction atmosphérique a priori moins critiques que pour les techniques radioélectriques.

En comparaison aux autres techniques de géodésie spatiale, le segment spatial de la télémétrie laser se limite à un ou plusieurs rétro réflecteurs placés sur les satellites. Tous les autres éléments utilisés pour la détermination des distances sont basés au sol. Ainsi, il est toujours possible d'intervenir dans le processus technique afin de corriger des défauts, d'améliorer les mesures ou de faire face à une panne, ainsi que de contrôler les différents sous-systèmes jouant un rôle dans l'exactitude globale des observations.

Les facteurs importants dans les applications géodynamiques sont :

- le large domaine d'altitude des cibles,
- les corrections du centre de masse pour chaque satellite,
- l'ajustement de la correction de l'erreur liée à la réfraction atmosphérique,
- l'amélioration simultanée de l'échelle du repère de référence terrestre,
- les erreurs des modèles d'accélération non-gravitationnelle,
- l'ajustement des biais en distance par station et par cible,
- les erreurs induites par la « signature » des panneaux de rétro réflecteurs laser.

La télémétrie laser joue aussi un rôle important en tant que système de secours fiable en cas de panne ou de défaillance des autres systèmes de poursuite¹. L'installation d'un réflecteur laser sur un satellite est d'un coût très modeste et dans tous les cas, la durée de vie utile (fiabilité et longévité) des composants orbitaux impliqués dans la technique laser est bien plus grande que celle des autres technologies spatiales.

La télémétrie laser, en tant qu'unique technique de mesure absolue de distance pour la poursuite de satellites et pour le positionnement d'une station d'observations, permet de contrôler les techniques radioélectriques (Doppler, radar) sur de grandes lignes de base (> 1 000 km). Ainsi, dans le cas où des satellites embarquent d'autres systèmes de poursuite et d'orbitographie, les données laser sont utiles pour étalonner précisément les autres systèmes par des mesures de distances absolues. Les mesures

¹ Exemples de la défaillance du récepteur PRARE du satellite ERS-1 et de la panne dès le lancement des deux récepteurs GPS du satellite GFO-1.

laser permettent également le rattachement en position des autres systèmes de référence par rapport au centre des masses de la Terre.

L'ancienneté, la longévité ainsi que la stabilité uniques des observations laser permettent de relier dans le temps les déterminations des paramètres géodynamiques et orbitaux. Cette capacité est d'autant plus intéressante dans le cas des satellites océanographiques (ERS-1, ERS-2, ENVISAT ou T/P puis JASON-1) afin d'assurer la continuité de leurs mesures sur le long terme et de comparer leurs différentes observations.

La technique laser reste donc aujourd'hui un complément indispensable aux autres techniques de géodésie spatiale telles que GPS, DORIS, GLONASS ou VLBI.

Cependant, les mesures laser présentent des faiblesses. Ainsi, on peut citer la mauvaise répartition géographique des stations, la dépendance vis-à-vis de la météorologie (les observations ne peuvent se faire que lorsque le ciel est suffisamment dégagé), le fait qu'elles ne sont pas entièrement automatisées (technique très gourmande en personnel) et leur coût de réalisation et d'utilisation. Ainsi, son extension est ralentie par les coûts de mise en œuvre et par son incapacité à fonctionner lorsque la couverture nuageuse est trop abondante¹.

Selon les techniques, les périodes d'observations nécessaires pour tel ou tel besoin scientifique sont différentes. Par exemple, en télémétrie laser, pour une co-localisation, un minimum de 2 ou 3 mois d'observations est nécessaire, ce qui représente environ 100 à 200 passages de satellites. Pour l'étalonnage des altimètres océanographiques, 6 mois de données sont nécessaires afin de disposer de suffisamment de passages dits de « calibration » pour aboutir à un résultat valable.

L'existence de biais moyens systématiques entre les mesures GPS et GLONASS par rapport aux mesures laser a été mise en évidence. En effet, les distances semblent trop courtes d'environ 6 cm et 4 cm respectivement dans le cas de GPS et GLONASS par rapport à celles déduites des orbitographies radioélectriques. L'origine d'un tel écart est probablement liée aux corrections de signature de satellite et notamment à la détermination exacte de la position du centre de masse par rapport aux rétro réflecteurs laser [Barlier et al., 2000].

Aujourd'hui, les capacités de la télémétrie laser dans la détermination d'orbites précises et dans quelques domaines de la géophysique sont complétées par de nombreuses techniques de radionavigation comme GPS, DORIS, GLONASS ou PRARE. Bien que la télémétrie laser fournisse des « distances absolues » par rapport à ces systèmes, un effort est réalisé par la communauté laser afin d'améliorer le coût d'efficacité de la télémétrie laser par le développement de systèmes semi ou entièrement automatiques. La présence de nombreux satellites ayant à la fois des rétro réflecteurs laser et un ou plusieurs systèmes de radionavigation (émetteur/récepteur) à leur bord montre l'intérêt de continuer la télémétrie laser sur satellites. Cela offre également une opportunité unique de combiner les différentes sources de données afin d'atteindre une exactitude absolue, l'unification des repères de référence et une densification des mesures, ce qui ne pourrait être obtenu avec une seule technique. Finalement, la compétition entre les différentes techniques de géodésie spatiale a abouti au progrès de toutes.

En conclusion, la télémétrie laser figure parmi les procédés les plus exacts pour déterminer une orbite de satellite (à quelques millimètres près pour la composante radiale) et pour corriger les systématismes s'y référant. Les techniques radioélectriques comme DORIS et GPS présentent les avantages d'une très grande facilité d'utilisation et de performances au niveau centimétrique. Toutefois, la technique laser reste la seule permettant d'accéder avec exactitude directement à la

¹ Cette technique ne peut donc pas être mise en place partout dans le monde.

mesure recherchée (distance). Les limitations actuelles de cette technique sont dues à la propagation dans l'atmosphère, mais à un degré moindre que pour les techniques radioélectriques, ce qui lui confère un avantage en terme d'exactitude. Cependant, dans certains domaines d'applications, les techniques radioélectriques ont supplanté les observations laser. D'autre part, la télémétrie laser est parmi les techniques de géodésie spatiale celle qui définit avec la meilleure exactitude l'origine du repère de référence (centre des masses de la Terre).

Chapitre 2

INSTRUMENTATION

1. Introduction

La plupart des applications mentionnées dans le premier chapitre requièrent une exactitude de plus en plus grande afin de pouvoir séparer les différentes composantes des signaux géophysiques observés et d'avoir accès à des phénomènes de plus en plus fins. Ainsi, dans chacun des domaines cités dans le premier chapitre, le véritable défi scientifique de la prochaine décennie consiste à obtenir une exactitude meilleure que 1 cm. Cependant, aujourd'hui, dans beaucoup d'applications géodésiques de la télémétrie laser, le niveau d'exactitude sub-centimétrique n'est pas encore atteint [Bonnefond et al., 1998], [Marshall et al., 1995]. Il est donc fondamental pour la télémétrie laser d'aboutir rapidement à ce niveau de performance sur l'ensemble du réseau.

Une station laser est un outil de haute technologie dont chaque élément joue un rôle déterminant sur la qualité finale des mesures. C'est pourquoi il est nécessaire de limiter au maximum à chaque niveau les erreurs de toute nature. De plus, tandis que les performances des mesures laser augmentent, des sources d'erreurs ou des signaux géophysiques précédemment négligés émergent du bruit. L'exactitude actuelle des systèmes laser est donc le fruit d'efforts soutenus et constants à tous les niveaux de l'instrumentation.

Le but premier de ce travail de thèse était d'améliorer la précision et l'exactitude des mesures de la Station Laser Ultra Mobile afin d'atteindre un niveau d'exactitude centimétrique, notamment dans l'objectif de relever le défi du satellite océanographique JASON-1, comme indiqué dans le premier chapitre de ce document. Ce désir d'amélioration des performances de la station a conduit à la mise en œuvre plus ou moins aisée de nombreuses modifications technologiques, parfois importantes, et à faire preuve d'imagination pour allier efficacité et compacité des procédés. Cela a également conduit à revoir certains points dans leur intégralité comme les montures opto-mécaniques des éléments constituant le banc laser. Cependant, mes investigations m'ont amenée à considérer le problème de l'exactitude des mesures de télémétrie laser à un niveau plus global, et à prendre conscience des difficultés à surmonter. Ainsi, au cours de cette thèse, j'ai pu appréhender les différents paramètres pouvant intervenir sur la qualité des mesures tant du point de vue de l'observateur, de l'instrumentaliste que de celui de l'analyste. Cette complémentarité entre les différents aspects fut très riche d'enseignements et m'a fait comprendre combien des choses apparemment plus ou moins mineures pouvaient grandement affecter la qualité finale des mesures. Ainsi, il faut tenir compte de la qualité de la prévision des passages de satellites, de la poursuite du télescope, de l'étalonnage de la station, de la stabilité du laser, de son réglage et de sa divergence, de la température du banc laser, de la détection des photons au départ et à l'arrivée, de la configuration du passage, du type de satellite observé, des données météorologiques pour la correction atmosphérique, etc. Les points aberrants, le bruit observationnel tout comme les erreurs systématiques doivent être soigneusement déterminés ou corrigés, notamment par la procédure d'étalonnage des mesures. Enfin, il faut pouvoir estimer la part de chacun de ces paramètres dans le bilan d'erreur global des observations.

DIFFERENTES SOURCES D'ERREUR

Dans toute analyse d'erreurs, il faut distinguer les incertitudes liées au dispositif de mesures et celles extérieures à l'instrumentation (propagation de la lumière, fluctuations de l'indice de réfraction de l'air, statistique des photons, bruits électroniques, conditions de mesures) [Bock, 1996]. Ces incertitudes peuvent être de deux natures : systématique ou aléatoire.

L'erreur systématique peut être de cause connue ; on peut et on doit alors en éliminer l'influence soit par calcul soit par une méthode opératoire appropriée. Une corrélation dans la grandeur de certaines erreurs indique l'existence d'erreurs systématiques. Les erreurs accidentelles sont, quant à elles, aléatoires, a priori bornées en valeur absolue et d'autant moins fréquentes que grandes en module, mais on ne peut a priori prédire leur signe ni a fortiori leurs valeurs numériques. Il existe des sources d'erreur, comme le jeu dans les axes de la monture du télescope, l'imprécision des pointages au cours de la poursuite, etc. qui ont parfois des causes et des effets indésirables, mais dont le mode d'action ne permet aucune mise en équation précise. Ce sont des erreurs accidentelles et il est impossible d'en corriger a priori le résultat. A posteriori, on peut, tout au plus, en évaluer l'ordre de grandeur par différence. Elles sont soumises au hasard. On tente alors de les éliminer par la multiplication des mesures.

Une attention particulière doit être portée afin de s'assurer de prendre en compte toutes les erreurs puisque l'effet d'une erreur a priori "négligeable" peut être redoutable par l'effet d'accumulation sur une somme de mesures. Ainsi, tout instrumentaliste se doit d'éliminer toutes les erreurs systématiques, de dépister celles qui présenteraient ce caractère et d'être sans cesse à l'affût de tout perfectionnement tant instrumental qu'opératoire susceptible de les minimiser.

Si les erreurs sont indépendantes, l'amplitude de l'erreur globale correspond à $\sigma = \sqrt{\sum_i e_i^2}$ où les e_i sont les erreurs individuelles. Dans le cas d'une correction parfaite d'erreurs systématiques, la dispersion des résultats constitue un premier critère de qualification des mesures. Dans la situation idéale où les observations ne sont plus affectées que par des erreurs purement accidentelles, l'erreur finale des mesures est inversement proportionnelle à la racine carrée du nombre de mesures. L'estimation des erreurs systématiques est donc le problème expérimental majeur auquel il faut faire face.

SITUATION EN TELEMETRIE LASER

Les facteurs limitant l'exactitude de la télémétrie laser sont de différentes nature. Tout d'abord au niveau du réseau la majeure faiblesse de cette technique est liée à la mauvaise répartition des stations à la surface du globe. En ce qui concerne les stations elles-mêmes, l'exactitude de leurs mesures est limitée, en dehors de l'instrumentation au sol, par la distribution des réflecteurs laser sur les satellites (signature du satellite) et par la correction du délai troposphérique de propagation.

En ce qui concerne le premier point, on observe des améliorations régulières de la répartition géographique du réseau international, mais il y aura toujours des limitations de base, notamment dues à la couverture nuageuse semi-permanente dans certaines régions du globe [Kasser et Bock, 1998]. Cependant, il ne faut pas négliger le rôle possible d'une station comme la Station Laser Ultra Mobile dans ce domaine.

Concernant la disposition des rétro-réflecteurs laser sur le satellite, les modèles ont été considérablement améliorés [Otsubo et al., 1997] et de nouveaux types de rétro-réflecteurs laser pourraient aussi être utilisés [Kasser et Lund, 1994b]. L'erreur sur la correction de la traversée de la troposphère par le faisceau laser liée à la composante sèche est quant à elle très petite, si la pression atmosphérique est correctement mesurée au niveau de la station. Néanmoins, celle liée à la composante humide de l'atmosphère reste une limitation principale d'exactitude des mesures de télémétrie laser. A ce niveau, on attend beaucoup de la télémétrie deux couleurs [Degnan, 1993],

[Lucchini, 1995], [Bianco et al., 1998], [Boër et Hessels, 1998], technique qui devrait permettre de réaliser des corrections automatiques au niveau de quelques millimètres.

De manière plus précise, les erreurs en télémétrie laser peuvent être séparées en deux catégories : celles externes à la station d'observations et celles d'origine instrumentale [Jiyu, 1986], [Schreiber et al., 1999]. Parmi les premières, on trouve :

- l'erreur liée à la vitesse de propagation effective du faisceau laser dans le milieu traversé,
- l'erreur de l'estimation de l'indice de réfraction résultant de mesures météorologiques inexactes ou mal représentées par les valeurs au niveau du sol,
- l'erreur liée à une correction inexacte de la position du centre de masse du satellite,
- l'erreur liée à l'orientation et la nature du panneau de réflecteurs par rapport à la direction de propagation du faisceau lumineux, chaque photon de retour pouvant avoir été réfléchi par un des coins de cube pris au hasard dans le panneau de rétro-réflecteurs,
- l'erreur liée à une mauvaise synchronisation de l'horloge de référence,
- l'erreur résultant de mesures inexactes de l'étalonnage du système.

Concernant les sources instrumentales, il faut aussi considérer :

- l'erreur de la fréquence de référence utilisée pour le chronomètre et/ou le dateur, erreur due à une différence entre les valeurs nominale et réelle de la fréquence,
- l'erreur de chronométrie issue des caractéristiques intrinsèques du chronomètre,
- l'erreur de détection et de datation résultant des variations du niveau du signal de retour,
- l'erreur générée par la largeur de l'impulsion laser et par ses variations. La largeur des impulsions lumineuses dégrade également la précision des mesures en générant une incertitude sur l'instant d'émission du photon revenant de la cible et reçu par le photodétecteur de retour,
- l'erreur liée aux distorsions du front d'onde du faisceau laser lors de la traversée de l'atmosphère et de celle des rétro-réflecteurs,
- l'erreur due aux instabilités du temps de transit dans le photodétecteur. La transformation des impulsions lumineuses en impulsions électriques par l'intermédiaire de détecteurs constitue une première source d'incertitude importante puisque l'intervalle de temps séparant l'impulsion lumineuse de l'impulsion électrique n'est jamais tout à fait le même d'une mesure à l'autre,
- les variations de chemin optique dans l'instrument (liées à des phénomènes thermiques ou mécaniques) dégradent aussi l'exactitude de la mesure. Cependant, comme ces changements s'opèrent à très long terme, des étalonnages réguliers permettent de réduire l'influence sur la qualité des mesures.

Ces différents problèmes ne pouvant tous être détaillés dans ce document, seuls les aspects les plus essentiels et que j'ai le plus étudiés, seront abordés au cours de ce chapitre consacré à l'inexactitude des mesures du point de vue de l'instrumentaliste.

Tandis que les mesures géodésiques approchent le niveau de précision sub-centimétrique, les sources d'erreur sont de plus en plus difficiles à diagnostiquer uniquement à travers des tests d'ingénierie ou à partir de l'examen minutieux des analystes. La télémétrie laser, comme chacune des autres techniques de géodésie spatiale, a sa propre famille de sources d'erreur avec leur propre

signature qui altèrent la globalité des mesures. Quelques sources d'erreur peuvent avoir tendance à se moyenniser avec le temps pour certaines quantités géodésiques observables. D'autres, cependant, peuvent être significativement corrélées avec les propriétés géophysiques que l'on veut étudier. Par exemple, les erreurs liées aux effets de la température sur les câbles peuvent avoir la même périodicité que les effets diurnes de la rotation terrestre ou des marées.

Le mélange de techniques de poursuite peut permettre de tirer profit des différences de nature des sources d'erreur pour comprendre la faiblesse de chacune des techniques et combiner les résultats d'une manière plus avantageuse. Un tel mélange peut être particulièrement intéressant dans la construction de modèles de phénomènes géodynamiques locaux plus élaborés. Un exemple d'application d'utilisation combinée de plusieurs instruments figure dans le Chapitre 3.

Les instruments laser sont étalonnés en permanence (voir troisième partie de ce chapitre) et occasionnellement vérifiés par des co-localisations. Pour des mesures sur des cibles sphériques et parfaitement stables comme les satellites LAGEOS, les biais instrumentaux significatifs sont plus facilement repérés et donc séparés à partir de la seule analyse des mesures. Une grande quantité de données est nécessaire pour séparer les signaux géophysiques des bruits instrumentaux et il est nécessaire de faire attention à toutes les sources d'erreur instrumentales possibles [Dunn et Torrence, 1994].

D'autre part, les changements liés à une amélioration de l'instrumentation ont des effets visibles sur les résultats sur de longues périodes. Des modifications de matériel peuvent en effet influencer directement et/ou indirectement les mesures laser. On peut alors séparer le signal lié à l'instrumentation du signal géophysique par comparaison des observations avec celles d'autres stations qui ne changent pas leur instrumentation pour avoir une idée de la composante non instrumentale.

La recherche de la précision des mesures augmente notre capacité à identifier les sources d'erreurs systématiques existantes. Un effort considérable est réalisé, à tous les niveaux et depuis quelques années, afin de découvrir et diminuer de manière détaillée les effets des sources d'erreur connues et la communauté laser est constamment à l'affût de nouvelles sources à identifier et éliminer [Appler, 1986]. Les sources d'erreur systématique noyées dans le bruit des mesures sont maintenant bien identifiées et des moyens sont mis en œuvre pour les minimiser autant que possible.

Finalement, les systèmes de télémétrie laser ont aujourd'hui en moyenne des précisions de 1 à 3 mm sur les points normaux¹ et inférieures à 1 cm en simple tir [Degnan, 1993]. La précision des stations est cependant loin d'être uniforme, variant de moins de 1 cm à 20 cm sur un tir et de 1 mm à 4 cm sur les points normaux.

Après une description des différentes stations de télémétrie laser du plateau de Calern, ce chapitre indique les différentes sources d'erreur à considérer au niveau de l'instrumentation, notamment en ce qui concerne le laser, la détection, la chronométrie, l'étalonnage et les corrections liées à la signature du satellite ainsi que celles liées à la propagation du faisceau laser dans l'atmosphère. Il décrit également les modifications réalisées sur la FTLRS pour pallier ces difficultés. Enfin, il présente des mesures, faites en laboratoire, de la contribution des éléments clé de la station mobile au bilan d'erreur.

¹ Un point normal est un point moyen synthétique de mesures individuelles. Le procédé de leur construction est indiqué en Annexe D.

2. Les stations de télémétrie laser de l'OCA

Le réseau international comprend une large variété de stations, à la fois en termes de construction, d'instrumentation, d'équipement, de méthode d'étalonnage, de création de points normaux et de pré-traitement des données. Quelques exemples de stations performantes et récentes ou en cours de développement sont donnés en Annexe B.

2.1. La station laser fixe

La station laser satellites fixe du plateau de Calern (voir Figure 2.1) utilise, comme beaucoup de stations du réseau mondial, un laser Nd:YAG¹ doublé en fréquence. Le faisceau lumineux ainsi produit a une longueur d'onde de 532 nm (vert), au lieu de 1 064 nm (infrarouge) pour le mode fondamental de ce type de laser. Le fonctionnement en mode bloqué du laser permet d'obtenir des impulsions qui, dans le cas de cette station, ont une largeur de 50 ps et sont émises avec une fréquence de 10 Hz. L'énergie par impulsion est de 50 mJ en infrarouge et 25 mJ dans le vert². L'utilisation d'un laser Nd:YAG permet d'avoir une énergie à la source relativement élevée et d'employer une longueur d'onde située dans une fenêtre de transmission de l'atmosphère. La plupart des stations utilisent un laser de ce type doublé en fréquence, donc une émission dans le visible, car les photodétecteurs étaient auparavant peu sensibles au rayonnement infrarouge. La longueur d'onde verte est surtout utilisée pour la rapidité et la précision des photodétecteurs dans cette longueur d'onde, points essentiels en télémétrie laser.

L'émission de la lumière se fait par une lunette placée sur le côté du télescope de réception (voir Figure 2.2). Ce dernier a un diamètre de 1 m et une distance focale de 8 m. L'utilisation d'une lunette d'émission permet de régler les problèmes de divergence, de ne pas gêner la réception des photons provenant de la cible et surtout d'éviter les difficultés liées à la commutation émission/réception. La lunette placée sur le dessus du télescope sert, via une caméra à haute sensibilité, au pointage des étoiles et au contrôle visuel du suivi de nuit du satellite lorsque celui-ci est visible car éclairé par le Soleil.

Le détecteur de retour est une photodiode à avalanche compensée électroniquement des effets de variations de temps de transit en fonction du nombre de photons incidents ; ce détecteur est communément appelé C-SPAD³ et ses caractéristiques seront détaillées ultérieurement au cours de la quatrième partie de ce chapitre. Cette photodiode est refroidie à -60°C afin de limiter son bruit interne.

La chaîne de chronométrie de cette station comprend un détecteur de départ sur le banc laser (photodiode en mode linéaire), un chronomètre Stanford et la base de fréquence est fournie par le signal à 10 MHz de l'horloge au césium du service temps-fréquence de l'OCA.

Le système d'étalonnage de la station sera décrit en troisième partie de ce chapitre.

¹ Du nom du milieu amplificateur utilisé pour produire l'effet laser. Ici il s'agit de monocristaux de grenat $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ appelés YAG (Yttrium Aluminium Grenat) dopés au Néodyme Nd^{3+} .

² Soit une puissance crête de 0,5 GW.

³ C-SPAD pour *Compensated Single Photon Avalanche Diode*.

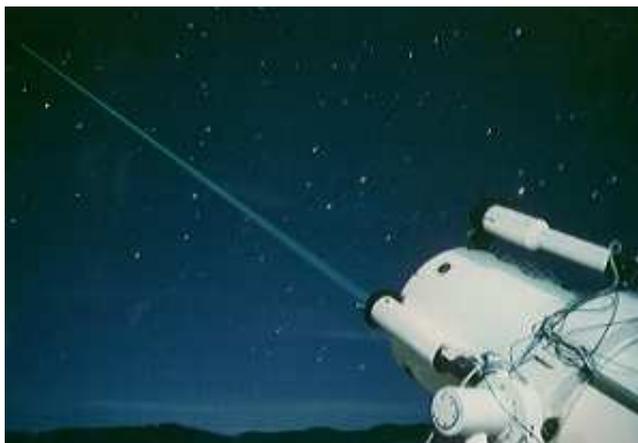


Figure 2.1 : Station laser satellites fixe du plateau de Calern.



Figure 2.2 : Télescope de la station laser satellites fixe du plateau de Calern. Sur la gauche de celui-ci, on distingue l'optique d'émission du laser et l'équerre optique (boîte blanche) servant pour les mesures d'étalonnage. Sur le haut se trouve la lunette de visée.

2.2. La station laser Lune

La station laser Lune de l'Observatoire de la Côte d'Azur utilise un seul télescope pour l'émission du faisceau laser, la réception des photons et la visualisation, via une caméra, des cibles à poursuivre. Il s'agit d'un télescope de 1,54 m de diamètre et 31 m de distance focale¹ (voir Figure 2.3). La commutation entre les différentes voies de fonctionnement du télescope se fait par l'intermédiaire d'un système de miroir tournant² [Torre, 1998].

Là encore le laser utilisé est un laser Nd:YAG doublé en fréquence avec des impulsions de 300 ps de largeur à mi-hauteur, un taux de répétition de 10 Hz et une énergie par impulsion de 350 mJ³. En réalité, on envoie des trains de quatre impulsions séparées respectivement par 1,6 ns, 4,1 ns et 5,7 ns,

¹ Par rapport aux satellites, pour atteindre la Lune, il faut émettre un faisceau beaucoup moins divergent (1 à 2'' au lieu de 20'') et être capable de détecter un signal beaucoup plus faible (0,01 au lieu de quelques uns à 1 000).

² Solution technique possible dans le cas de la télémétrie laser Lune puisqu'on dispose de suffisamment de temps pour passer de l'émission du faisceau laser à la réception des photons.

³ Cela correspond à une puissance crête de 1,2 GW.

ce qui permet de connaître sans ambiguïté la position de l'impulsion dans le diagramme des échos [Samain et al., 1998].

Une partie des photons venant du laser est envoyée à une photodiode, elle-même connectée à un dateur, ce qui fournit la date de départ. Le détecteur de retour est connecté à un autre dateur, ce qui donne l'instant de retour. La base de temps des chronomètres est fournie par l'horloge atomique (césium) du service temps-fréquence de l'observatoire.

Le mode particulier d'étalonnage de la station laser Lune sera détaillé dans la troisième partie de ce chapitre. Cependant, on peut déjà faire une remarque importante à ce propos : étant donné que le nombre moyen de photons revenant de la Lune est très faible (0,01 par impulsion). La détection se fait en mode simple photo-électron. On se doit donc de faire l'étalonnage des mesures de la station dans ce même mode de détection.

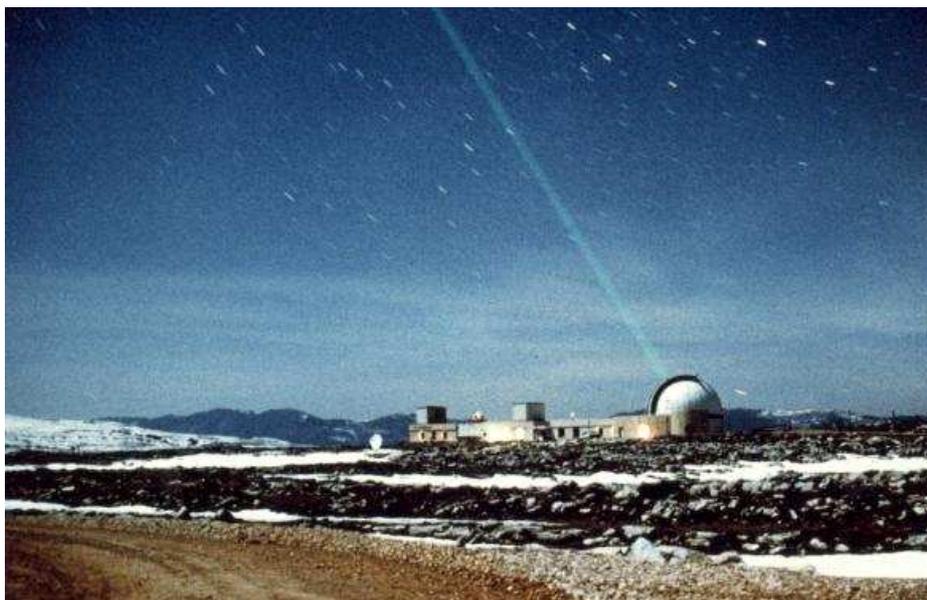


Figure 2.3 : Station laser Lune du plateau de Calern.

2.3. La Station Laser Ultra Mobile

La FTLRS¹ (voir Figure 2.4) est un système de télémétrie laser très mobile dont les différents éléments sont répartis en une dizaine de containers de transport répondant aux normes du fret aérien. Elle est basée sur le même concept que la station laser satellites fixe du plateau de Calern, mais en miniature. L'idée est d'utiliser un très petit télescope de 13 cm de diamètre installé sur une monture motorisée avec une grande précision. Le laser est également très compact et la détection des retours au niveau du simple photo-électron est réalisé avec une photodiode à avalanche. L'installation de la FTLRS est très rapide et son utilisation, presque entièrement automatisée, nécessite seulement deux opérateurs.

¹ FTLRS est l'acronyme du nom anglais de la Station Laser Ultra Mobile, à savoir *French Transportable Laser Ranging Station*.



Figure 2.4 : La Station Laser Ultra Mobile à Ajaccio au cours de la campagne en Corse (1997). On peut distinguer sur la gauche la station météorologique et l'antenne GPS. L'ensemble du reste de l'instrumentation se trouve sur la droite. La tente protectrice est repliée au sol à l'arrière de la station.

Tableau 2.1 : Résumé des caractéristiques actuelles de la Station Laser Ultra Mobile.

Poids total	300 kg (~10 containers < 55 kg)
Laser	Nd:YAG doublé en fréquence, $\lambda=532$ nm (vert), 50 mJ par impulsion, 10 Hz, largeur d'impulsion de 35 ps
Détecteur	Photodiode à avalanche en mode Geiger
Télescope	13 cm de diamètre, 2 kg
Conditions climatiques d'utilisation	0 à + 35°C, jusqu'à 95% d'humidité
Erreur de pointé	$\leq 10''$ rms
Système de chronométrie	Stanford SR620, Rubidium asservi sur GPS
Etalonnage	Cible externe, cible à la sortie du télescope

Les exigences suivantes ont été établies lors de la conception de la FTLRS :

- de faibles coûts opérationnels et une utilisation aisée,
- une capacité de poursuivre T/P (en particulier près de la trace au sol du satellite et donc près du zénith) avec une précision comparable à celle des stations fixes,
- une légèreté et une capacité d'installation rapide, immédiatement après le transport en fret aérien ordinaire ou en camionnette (le système est opérationnel en moins de 48 h). Les opérations de routine étant aussi automatisées que possible et le personnel nécessaire est limité.

Les options principales ont évidemment été conçues pour obtenir le plus petit poids possible afin de faciliter le transport et l'installation de la station laser. La réussite d'un tel degré de miniaturisation représente concrètement un **défi technologique considérable**.

Les principales caractéristiques techniques de la FTLRS (voir Tableau 2.1) peuvent être résumées comme suit :

- un poids total d'environ 300 kg, comprenant une dizaine de containers climatisés et permettant le transport de l'équipement, le plus lourd pesant 55 kg,
- une large capacité opérationnelle selon les conditions climatiques (de 0 à +35°C¹ ; jusqu'à 95 % d'hygrométrie),
- un laser avec une faible consommation d'énergie, capable d'accepter n'importe quel type de source d'énergie et avec de faibles besoins en maintenance locale,
- une photodiode à avalanche fonctionnant dans le mode Geiger, au niveau de la détection du simple photo-électron,
- un télescope très petit de 13 cm de diamètre utile,
- une monture basée sur un théodolite motorisé et stable pendant les opérations de terrain, avec une très grande précision (une erreur totale de quelques secondes d'arc, indépendamment de la température et des conditions de terrain),
- un système de mesure de distance se mettant à la place de la monture du télescope pour étalonner les cibles extérieures d'étalonnage.

Les principaux constituants de la FTLRS sont le laser, le télescope et une monture opto-mécanique, ainsi qu'un ordinateur gérant les systèmes électroniques de commande incluant l'horloge GPS, le laser, la monture, l'unité de chronométrie et le détecteur. Un schéma synoptique de la station est donné en Figure 2.5 et les différents composants sont décrits ci-après. Le lecteur peut trouver des informations dans [Nicolas et al., 2000] fournies en Annexe E.

Par rapport aux autres systèmes de télémétrie laser, le concept de la FTLRS est unique par sa compacité et l'utilisation d'un télescope de petite ouverture. La plupart des autres systèmes laser utilisent des télescopes 2 à 10 fois plus grands en diamètre et sont logés dans des remorques ou des bâtiments permanents bien plus grands. En conséquence, les caractéristiques de la conception de la FTLRS, sa fiabilité sur le terrain et ses performances globales en télémétrie sont intéressantes pour l'ensemble de la communauté laser.

¹ Mais il est apparu que le froid pouvait générer des problèmes, en particulier pour la qualité de la poursuite. En pratique, on ne peut observer à des températures inférieures à environ 0°C.

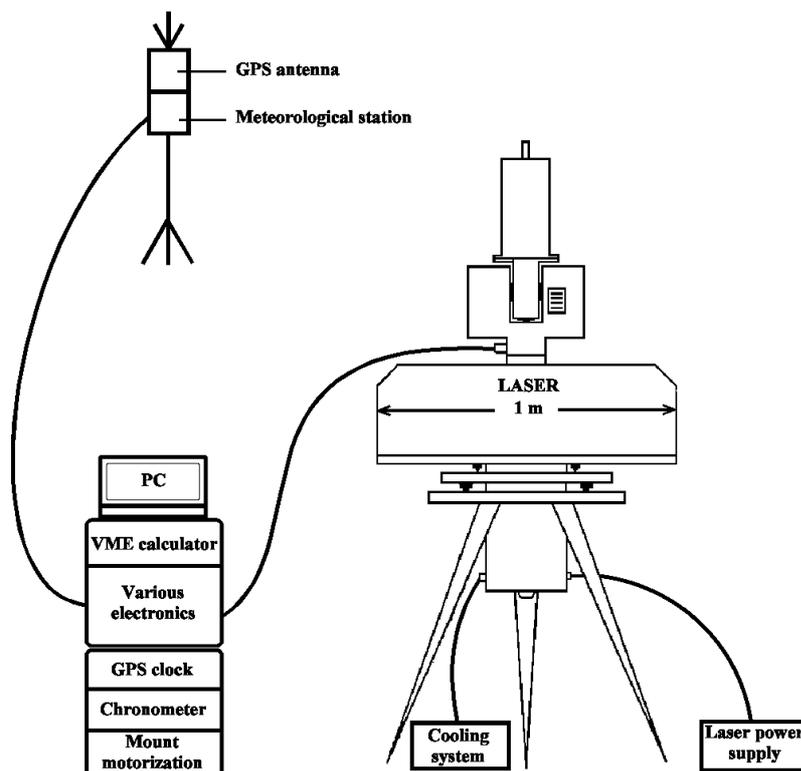


Figure 2.5 : Schéma synoptique de la Station Laser Ultra Mobile.

Le laser utilisé (voir Figure 2.6) est un laser compact dont le poids total est de 80 kg. Il s'agit d'un laser à blocage de mode qui délivrait initialement des impulsions de 100 ps à 10 Hz avec une énergie de 100 mJ à 1064 nm et 50 mJ par impulsion à 532 nm. Le laser comprend trois sous-ensembles : la tête laser proprement dite, le groupe de refroidissement et l'alimentation électrique. Le groupe de refroidissement (0,70 x 0,30 m²), qui pèse 18 kg, est dissocié du banc laser (il se pose au sol sous la station) pour éviter tout problème de vibration et diminuer la masse du banc laser. L'alimentation électrique a été entièrement conçue pour obtenir la meilleure qualité tout en minimisant la taille (0,40 x 0,40 x 0,30 m³), le poids (22 kg) et la consommation électrique. La tension d'entrée requise est de 110 ou 220 V, avec une fréquence de 50 ou 60 Hz. La consommation globale d'énergie pour le fonctionnement de la station est d'environ 2 000 W.

La tête laser pèse 40 kg mais aucun allègement significatif ne pouvait être obtenu sans mettre en danger la fiabilité de l'instrument. Les éléments optiques sont fixés sur un banc en fibre de carbone du type nid d'abeille de 1,00 x 0,30 m² dont le schéma optique est indiqué sur la Figure 2.7.

Le laser est constitué d'une cavité à modes bloqués suivi d'un étage amplificateur double passage. L'oscillateur comporte un barreau de Nd:YAG pompé par flash à déclenchement passif par absorbant saturable. Le mode TEM₀₀¹ (voir Figure 2.8) est sélectionné grâce à un filtre spatial (diaphragme). Le blocage de mode est obtenu à l'aide d'un modulateur acousto-optique, de l'absorbant saturable placé contre le miroir arrière de la cavité et d'un Fabry-Perot, également utilisé comme miroir de couplage.

¹ TEM₀₀ (*Transverse Electric and Magnetic*) correspond au mode transverse fondamental pour lequel la densité de flux est gaussienne et la cohérence spatiale maximale.

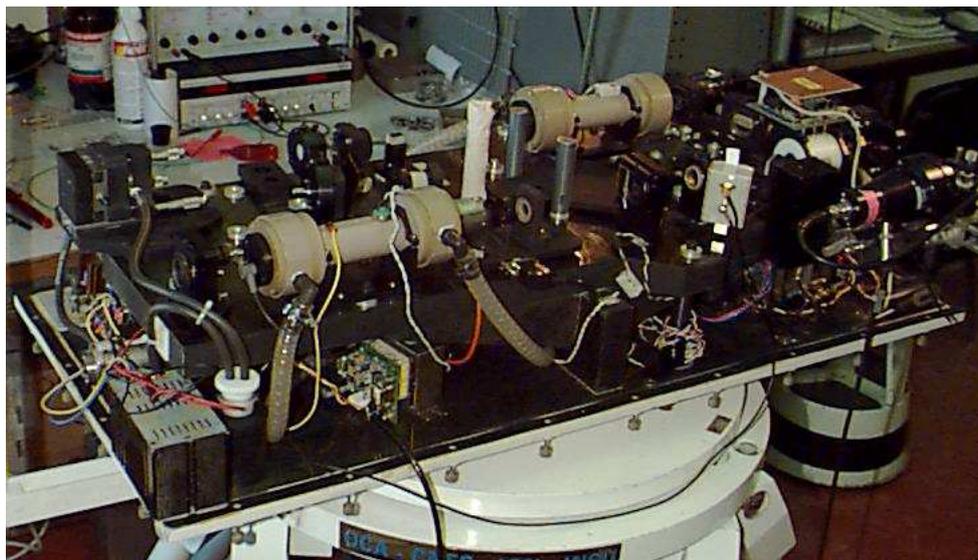


Figure 2.6 : Banc laser de la Station Laser Ultra Mobile.

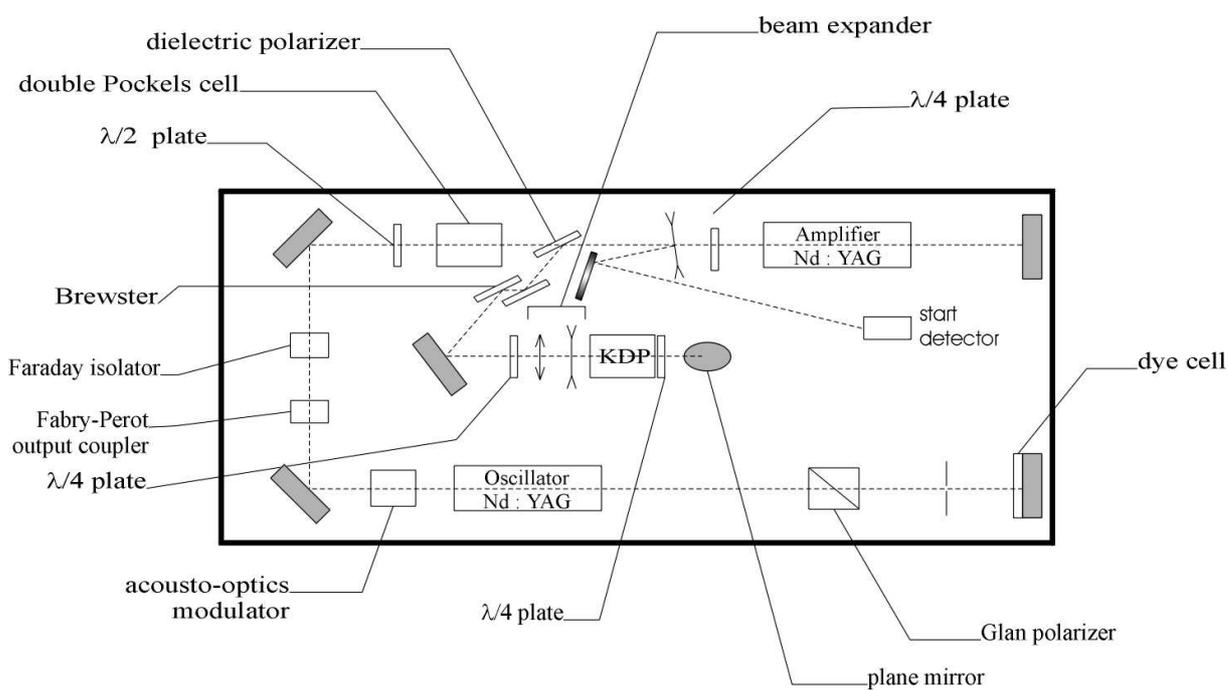


Figure 2.7 : Schéma optique du banc laser de la Station Laser Ultra Mobile.

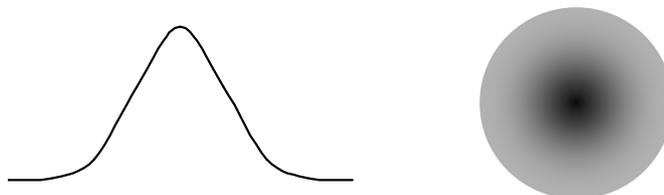


Figure 2.8 : Répartition spatiale de l'énergie d'un faisceau laser en mode TEM_{00} .

Un isolateur de Faraday¹ a été placé en sortie de cette cavité afin de la protéger de retours éventuels d'impulsions lumineuses de haute densité d'énergie déstabilisant complètement l'effet laser. La lumière passe à travers une double cellule de Pockels qui a la propriété de jouer le rôle d'une porte électronique dont la fermeture et l'ouverture sont commandées par l'application ou non d'une tension électrique (voir Figure 2.10). Ainsi, la deuxième partie du train d'impulsions est découpée avant d'être amplifiée par un second étage à Nd:YAG pompé par flash (amplificateur double passage). Puis le faisceau laser passe dans un cristal anisotrope KDP (potassium dihydrogène phosphate) qui a la propriété de doubler la fréquence de la lumière qui le traverse. C'est un cristal non linéaire optimisé pour le second harmonique de ce type de laser. A la sortie, on retrouve 50% d'énergie dans chaque longueur d'onde. Ainsi, on passe d'une longueur d'onde de 1064 nm à 532 nm (voir Figure 2.9).

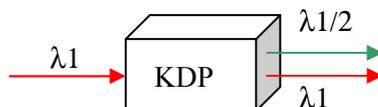


Figure 2.9 : Effet du passage de la lumière à travers un cristal non linéaire KDP.

Le découpeur permet de travailler en semi-train d'impulsions (voir Figure 2.11) et donc d'augmenter le nombre d'échos de retour et donc l'énergie. Ainsi, l'énergie par impulsion est moins importante et on a accès à une estimation simple en temps réel du signal de retour (comme les mesures sont réalisées en mode de détection simple photo-électron, on n'a aucune autre possibilité d'évaluer le niveau d'énergie de retour) (voir Figure 2.12).

Sous le banc optique se trouvent quelques éléments électroniques liés à l'alimentation des flashes, aux commandes du modulateur acousto-optique, à la synchronisation des cellules de Pockels et au découpeur d'impulsion.

¹ Composant optique permettant, par un jeu de polarisation, le passage de l'impulsion laser dans un seul sens.

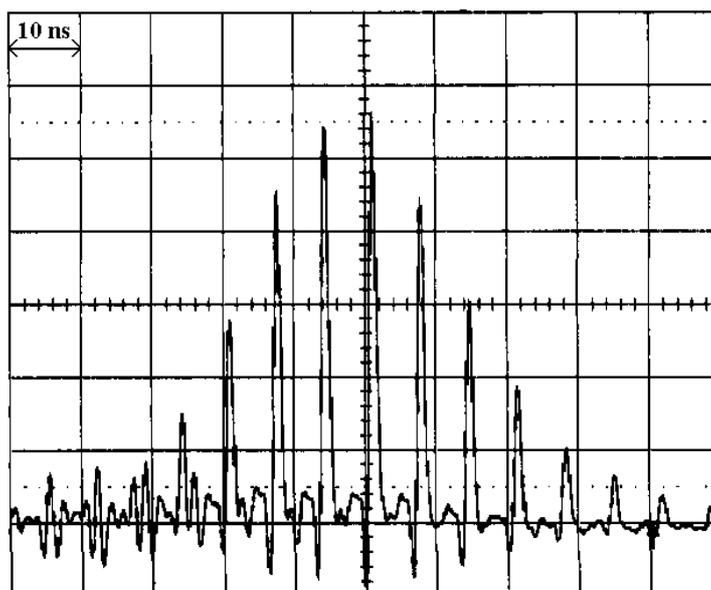


Figure 2.10 : Vue à l'oscilloscope d'un train d'impulsions laser par l'intermédiaire d'un photodétecteur à bande passante limitée (500 MHz).

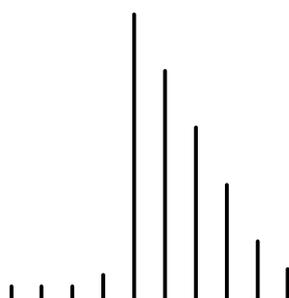


Figure 2.11 : Schéma d'un demi train d'impulsions laser. On peut voir devant l'impulsion la plus énergétique des impulsions imparfaitement éliminées (~1% de l'impulsion la plus énergétique).

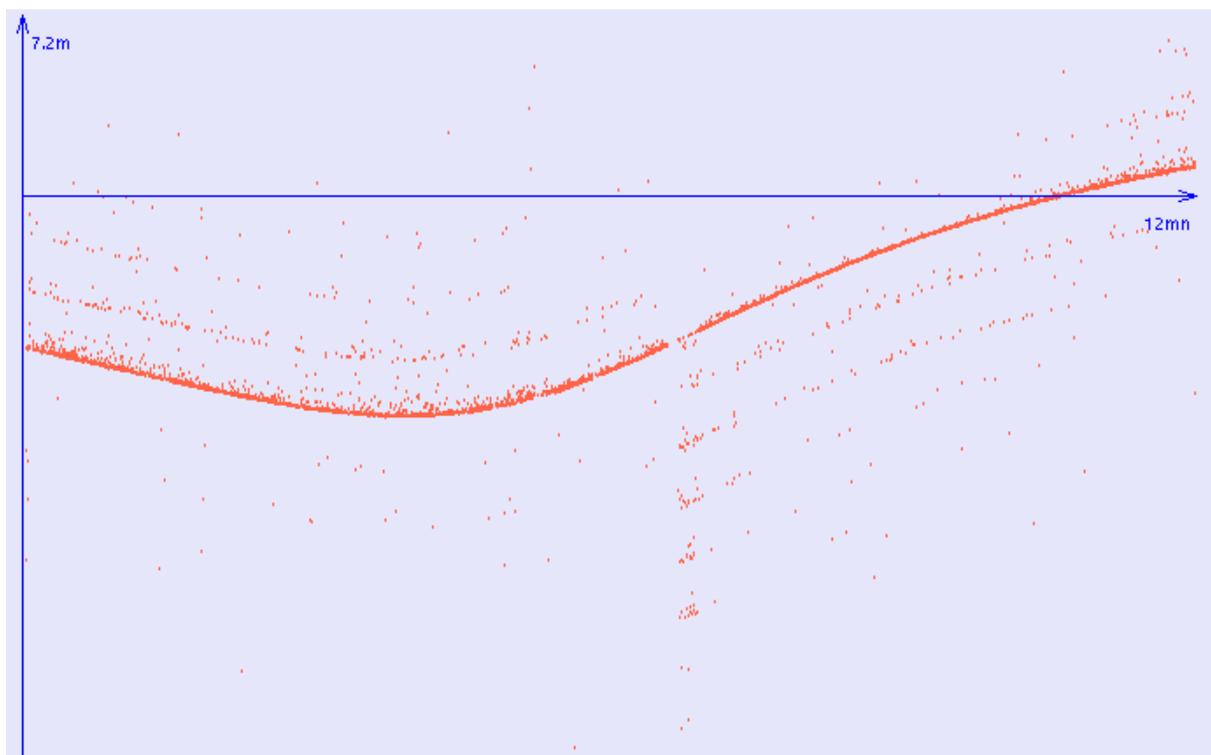


Figure 2.12 : Passage d'un satellite illustrant les effets des différences de niveau. Le début est acquis en mode de détection simple photo-électron tandis que la fin est observée dans un mode multi-photoélectron. Dans la seconde partie du passage, on peut voir les datations effectuées sur les impulsions imparfaitement découpées (échos avant la trace principale). L'échelle de temps est en abscisse et donne la durée du passage. L'ordonnée correspond aux résidus des observations par rapport à une orbite de référence.

La tourelle (voir Figure 2.13) a été conçue à partir d'un théodolite électronique motorisé de haute précision KERN E2. Cette base est vraiment intéressante car il a été prouvé qu'un tel équipement de terrain est capable de conserver toute sa précision ($\sim 1''$) dans n'importe quelles conditions climatiques, avec d'excellentes spécifications concernant les chocs et les vibrations. Ce théodolite a été modifié de telle sorte qu'on puisse y installer le télescope (la partie optique pèse 9 kg). La motorisation permet une vitesse angulaire maximale de 60° par seconde, le suivi orbital étant possible jusqu'à une hauteur de $80-85^\circ$ au moins, selon la vitesse du satellite.

La tourelle est posée directement sur un support fixé sur le banc laser qui repose lui-même sur un trépied spécial. Ce trépied, qui pèse 30 kg, est très stable et permet le centrage précis de l'ensemble laser-tourelle sur un marqueur de référence géodésique au sol et la verticalisation précise de l'axe principal de la monture. Avec ce principe, on dispose d'un système standard et très pratique de suivi permanent de l'inclinaison de l'axe principal, ce qui offre une capacité de poursuite, même si quelques instabilités de la plate-forme se produisaient.

L'émission du faisceau laser, la réception des échos et la poursuite visuelle avec une caméra CCD sont faites à partir d'un télescope Cassegrain, fabriqué par la société SESO, de 13 cm de diamètre, allégé grâce à sa structure en fibre de carbone (il pèse 2 kg). C'est le plus petit télescope jamais utilisé en télémétrie laser. Un tel système optique multi-utilisation a été difficile à concevoir et à régler, mais

une fois que tout est ajusté, tout désalignement est pratiquement impossible¹. Ce point est essentiel pour un tel instrument exposé aux chocs et aux vibrations pendant son déplacement, quel que soit le type de transport utilisé. Les différentes opérations réalisées jusqu'à présent n'ont pas provoqué de désalignement de cet ensemble optique très compact.



Figure 2.13 : Tourelle et télescope de la Station Laser Ultra Mobile.

On sépare le signal de départ du signal de retour par un jeu de polarisation. Le faisceau laser monte dans le coudé en polarisation circulaire, puis une lame quart d'onde la transforme en polarisation rectiligne. Le faisceau est alors réfléchi au moins à 95% par un polariseur à angle de Brewster traité pour les hautes densités d'énergie qui envoie les impulsions dans le télescope à travers une autre lame quart d'onde (voir Figure 2.14). La lumière est donc émise en polarisation circulaire. La réflexion sur les rétroreflécteurs a plusieurs conséquences, selon l'angle d'incidence, et généralement la polarisation est plus ou moins modifiée. Quand un écho revient à travers le télescope, le nouveau passage de la lame quart d'onde produit une polarisation elliptique et une partie du faisceau (généralement plus de 50%) arrive dans le détecteur de retour après avoir traversé un filtre interférentiel à bande étroite (0,3 nm) permettant de limiter le bruit.

¹ Les possibilités de dérèglement sont faibles en raison de la compacité du coudé.

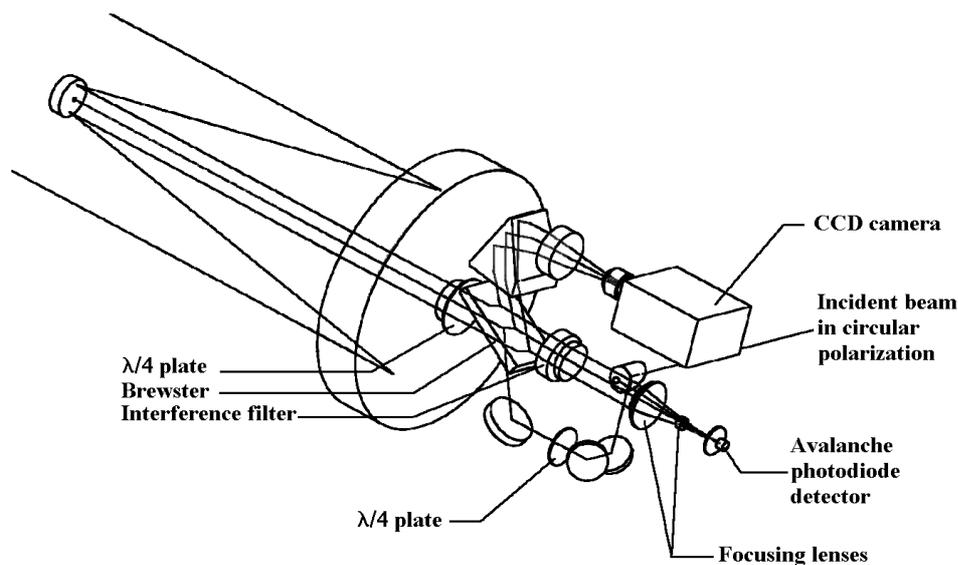


Figure 2.14 : Schéma optique de l'intérieur de la tourelle de la Station Laser Ultra Mobile. La photodiode à avalanche indiquée ici est remplacée par une fibre optique pour les expériences de transfert de temps.

Une réflexion sur la lame de Brewster est utilisée pour dévier une partie de la lumière reçue vers une caméra CCD miniature. Cette caméra permet, entre autres, de viser des étoiles afin d'obtenir l'origine absolue des azimuts du télescope à quelques secondes d'arc près et de vérifier la mise en station du système. Elle sert également à achever les alignements optiques sur les chemins du faisceau laser émis et reçu. La lumière qui arrive sur la caméra CCD est la lumière non transmise par le filtre interférentiel (réflexion de tout sauf le vert) se réfléchissant sur l'arrière de la lame de Brewster. Cela crée une commutation entre la transmission et la réception du laser, fonction principale de la lame de Brewster.

La détection du signal de départ se fait à l'aide d'une photodiode à avalanche située sur le banc laser sur laquelle on envoie une partie du faisceau infrarouge sortant de l'amplificateur double passage. La détection de l'écho de retour se fait à l'arrière du télescope. Elle est basée sur l'utilisation d'une photodiode à avalanche hypersensible fonctionnant en mode Geiger [Samain, 1995], fixée dans une petite chambre froide sur un système de refroidissement par effet Peltier visant à diminuer le bruit interne du détecteur. La température est stabilisée aux alentours de $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Cette photodiode offre l'avantage d'une extrême compacité, d'une bonne efficacité quantique (environ 15% alors que le premier détecteur infrarouge avait un rendement quantique de seulement quelques pour cent) et d'une sensibilité au simple photon-électron. L'utilisation d'une photodiode à avalanche très sensible est indispensable en raison de la faible surface collectrice des photons.

Pour mesurer les temps de vol des impulsions laser, on utilise un chronomètre Stanford SR620 permettant de mesurer le temps d'aller-retour des impulsions lumineuses à 10 ps près. Un oscillateur au rubidium de haute stabilité synchronisé par le réseau de satellites GPS fournit un signal sinusoïdal à 10 MHz servant de base de temps au chronomètre. Ce top seconde permet de raccorder, avec une exactitude de l'ordre de 100 ns, les datations par rapport au temps universel UTC.

Un automate du type VME 68060 exploité sous un système temps réel OS9 gère toute l'instrumentation : la station horaire (heure et position), le chronomètre, la tourelle, le laser, les capteurs de température (du laser par exemple), les cartes électroniques (datation, fenêtre de 10 ns). L'interface homme-machine se fait à partir d'un ordinateur PC sous Linux depuis lequel on commande directement la poursuite. Il permet à l'opérateur de corriger le pointé du télescope. Il permet aussi de régler le niveau du laser par l'intermédiaire du délai de fluorescence des flashes. Les paramètres de poursuite (temps, azimut, hauteur, porte temporelle, biais en temps...) peuvent être saisis en temps réel pendant l'observation ; la précision des mesures s'en trouve alors améliorée. L'ensemble informatique permet également l'acquisition des données, la visualisation graphique des résultats en temps réel (affichage de la différence entre la distance observée et la distance prédite en fonction du temps), le prétraitement des données (réception, stockage, envoi) et le calcul des points normaux d'une manière conviviale et simple à utiliser. Les logiciels de contrôle et de pilotage ont entièrement été réalisés à l'OCA. Ils sont complètement identiques, pour la plus grande partie, à ceux utilisés pour la station laser satellites fixe du plateau de Calern.

3. Etalonnage des stations laser

L'instabilité des biais instrumentaux est un problème tout à fait essentiel en métrologie. Elle est principalement due à l'évolution thermique à court terme des circuits électroniques (des détecteurs jusqu'à la chaîne de chronométrie) et aux variations du temps de transit du photodétecteur (fonction de la température, de la tension de polarisation et de l'énergie des échos) [Kasser et Bock, 1998]. Afin de prendre en compte les délais internes variables liés à l'instrumentation (température, réglages, azimut, hauteur...), des mesures d'étalonnage sur cible une fixe positionnée par d'autres méthodes avec grande précision (quelques millimètres) sont donc indispensables.

Remarque : L'étalonnage d'une station laser est très souvent désigné (le plus souvent oralement) dans la communauté géodésique par son expression anglaise « calibration ». Dans la suite de ce document, c'est le terme français « étalonnage » qui sera employé.

3.1. Principe

La procédure d'étalonnage est basée sur un principe très simple : il s'agit de mesurer au sol avec une station laser une distance très bien connue. Il est possible d'adopter en tant que distance de référence au sol soit la distance d'une cible locale située à quelques centaines de mètres¹ (étalonnage externe), soit la distance d'une cible placée à l'intérieur de la station laser elle-même (banc laser ou télescope), ce qui s'appelle alors étalonnage interne. Dans le cas d'un étalonnage externe, il faut aussi tenir compte de la réfraction atmosphérique. Si la cible d'étalonnage reste à moins de 100 m de la station, les problèmes de correction atmosphérique sont a priori modélisés de façon fiable (<1 mm). Les mesures d'étalonnage constituent également une bonne technique d'examen de la qualité des mesures.

La distance d'étalonnage correspond à la différence de distance entre les points de référence de la station et du coin de cube d'étalonnage. Afin d'obtenir une valeur précise de l'étalonnage, il est nécessaire de réaliser une série de mesures sur une certaine durée. Selon les stations constituant le réseau laser, les techniques d'étalonnage et le moment de leur réalisation par rapport aux observations sur satellites diffèrent. Ainsi, ces séries peuvent être effectuées avant, après ou au cours des passages de satellites. Dans certains cas, un étalonnage en temps réel est employé : les mesures d'étalonnage et de distance de satellite sont alors réalisées simultanément par deux voies différentes, comme dans le

¹ Cibles sur une montagne ou des piliers par exemple.

cas de la station laser Lune de l'OCA. Dans tous les cas, la distance entre la cible d'étalonnage et le point d'intersection des axes du télescope¹ doit être déterminée très précisément par des techniques géodésiques classiques au sol. Ces mesures peuvent en principe être réalisées avec un niveau de précision millimétrique et les deux méthodes d'étalonnage (interne et externe) peuvent être employées pour vérifier la cohérence des résultats.

3.2. Différentes procédures d'étalonnage

Au sein du réseau laser, il existe une très grande variété de procédures d'étalonnage, presque chaque station ayant son système propre, toutes avec des installations matérielles différentes.

3.2.a Cas des stations laser du plateau de Calern

Dans le cas de la **station laser Lune**, on procède à un étalonnage interne en temps réel avec une fraction du faisceau laser déviée vers la voie d'étalonnage par l'intermédiaire d'une fibre optique (voir Figure 2.15). Il existe aussi une autre possibilité d'étalonnage avec un rétro-rélecteur placé sur l'araignée du télescope, mais celle-ci n'est pas utilisée en temps réel.

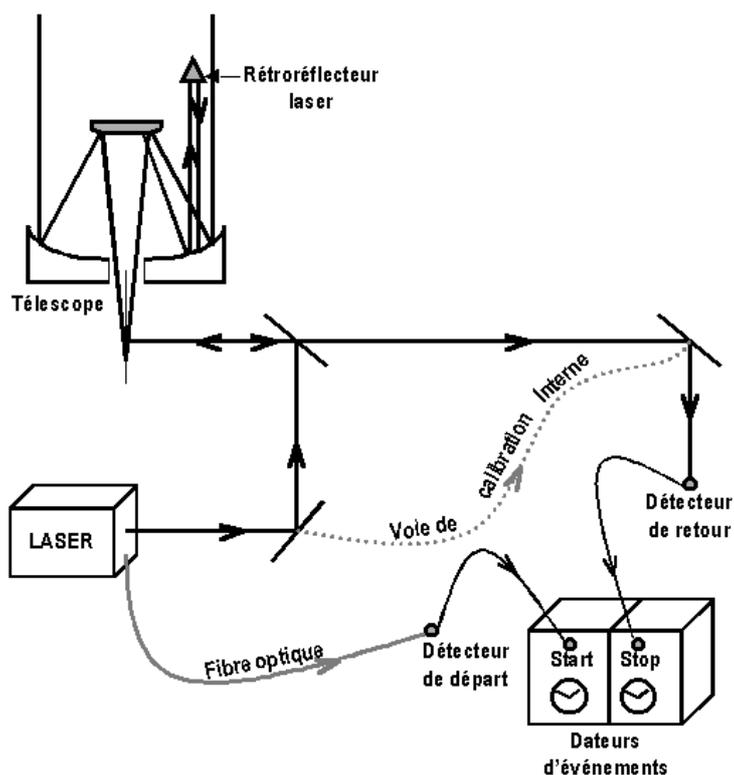


Figure 2.15 : Schéma de la procédure d'étalonnage de la station laser Lune du plateau de Calern. L'étalonnage interne se fait via la fibre optique et le rétro-rélecteur laser placé sur l'araignée du télescope sert à vérifier régulièrement la valeur d'étalonnage interne.

¹ La référence spatiale des mesures est le point de croisée des axes de la monture du télescope.

La cible d'étalonnage de la **station laser satellites fixe** se place à la sortie du télescope de réception (voir Figure 2.16). Ainsi, le faisceau laser émis à faible puissance est renvoyé directement dans le télescope. Cette procédure peut être considérée comme une sorte d'étalonnage interne. Les mesures d'étalonnage de cette station sont réalisées uniquement à la fin de chaque passage de satellite, excepté lorsque le planning des observations ne le permet pas et, dans ce dernier cas, la même valeur de distance d'étalonnage est utilisée pour plusieurs passages consécutifs de satellites.

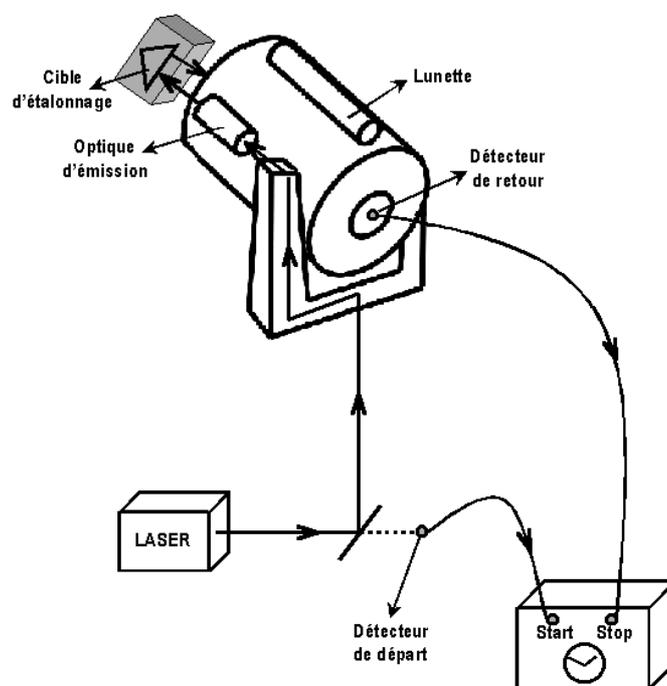


Figure 2.16 : Schéma du dispositif d'étalonnage des mesures de la station laser satellites fixe du plateau de Calern

La méthode d'étalonnage de la station laser fixe présente les avantages suivants :

- aucune correction atmosphérique à appliquer sur le parcours de la lumière,
- une excellente stabilité du chemin optique,
- une indépendance vis-à-vis de la météorologie,
- aucun problème de rétrodiffusion,
- capacité de vérifier la dépendance en azimut (effet ≤ 3 mm selon l'alignement du coudé dans le cas de cette station).

Cependant, elle présente aussi quelques inconvénients :

- le temps très court disponible pour la porte de présensibilisation de la photodiode,
- l'impossibilité de faire un étalonnage simultanément avec des mesures sur satellites.

Au plateau de Calern, la valeur de l'étalonnage de la station laser satellites fixe est stable d'un observateur à un autre au niveau de 2-3 mm.

En raison du concept et de la petite taille de la **Station Laser Ultra Mobile**, un système d'étalonnage externe était employé en visant une cible fixe au sol située entre 200 et 500 m. Cependant, un procédé similaire à celui employé dans le cadre de la station laser satellites fixe vient d'être mis en place (voir Figure 2.17). Dans ces conditions, on peut faire des mesures d'étalonnage soit externe sur des cibles proches soit interne en installant un rétroreflécteur sur la face de sortie du télescope.

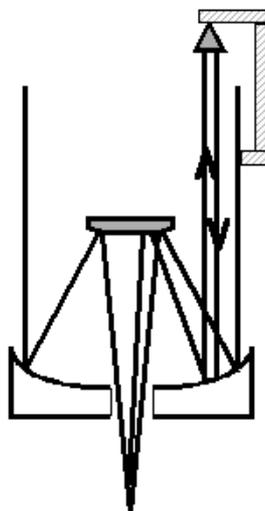


Figure 2.17 : Schéma du montage du rétroreflécteur d'étalonnage fixé au télescope de la Station Laser Ultra Mobile.

3.2.b Modification apportée à la FTLRS

Un nouveau mode d'étalonnage de la FTLRS a été développé au sein de l'OCA. Ce nouveau système est semblable à celui utilisé avec succès par la station laser satellites fixe depuis de nombreuses années sans aucun problème. La cible d'étalonnage n'est maintenant plus externe à la station à une distance de 200-300 m comme c'était le cas pendant la campagne en Corse, mais elle est désormais placée juste sur la face de sortie du télescope (voir Figure 2.18).

Un petit coin de cube de 15 mm de diamètre est placé juste devant le télescope de façon automatique. Une photodiode a ainsi été installée sur le banc laser juste avant le découpeur d'impulsion afin de permettre une sensibilisation du détecteur de retour à temps avant l'arrivée des échos laser¹.

Afin d'étalonner les mesures de la station, il est d'abord nécessaire de diminuer l'énergie du laser en utilisant un décalage de fluorescence entre les barreaux de l'oscillateur et de l'amplificateur puis en insérant des densités optiques² sur le banc laser avant l'amplificateur (voir Figure 2.19). Des densités optiques doivent également être placées avant le photodétecteur de retour et finalement le rétroreflécteur doit être positionné avant de réaliser les mesures d'étalonnage proprement dites.

¹ Il est nécessaire de sensibiliser la photodiode au moins 100 ns avant l'arrivée effective des photons (~15 m en distance). Auparavant, la distance minimale de la cible nécessaire à une bonne sensibilité du photodétecteur de retour au moment de l'arrivée des photons était de 200 m.

² Atténuateurs constitués de plaques de gélatine plus ou moins épaisses.



Figure 2.18 : Nouveau dispositif d'étalonnage des mesures de la FTLRS.

Au niveau mécanique, quelques contraintes ont dû être respectées afin d'assurer aucune déstabilisation du télescope liée au dispositif d'étalonnage, d'où la recherche d'une solution de petite taille et de faible poids garantissant également une stabilité de la distance d'étalonnage au niveau millimétrique. Ces considérations ont conduit à employer un servo-moteur d'aéromodélisme dont le temps de réponse inférieur à 0,2 s est suffisant pour la transition vers le mode d'étalonnage. L'atténuation de l'énergie du faisceau laser au niveau du photodétecteur de retour est assurée par un système de densités optiques variables mis en place avec le même type de motorisation (voir Figure 2.20). Il s'agit d'un système rotatif comprenant trois positions différentes : un simple trou, une densité élevée adaptée au mode d'étalonnage et une faible densité pour les observations de jour ou de satellites ayant un fort bilan de liaison comme T/P.

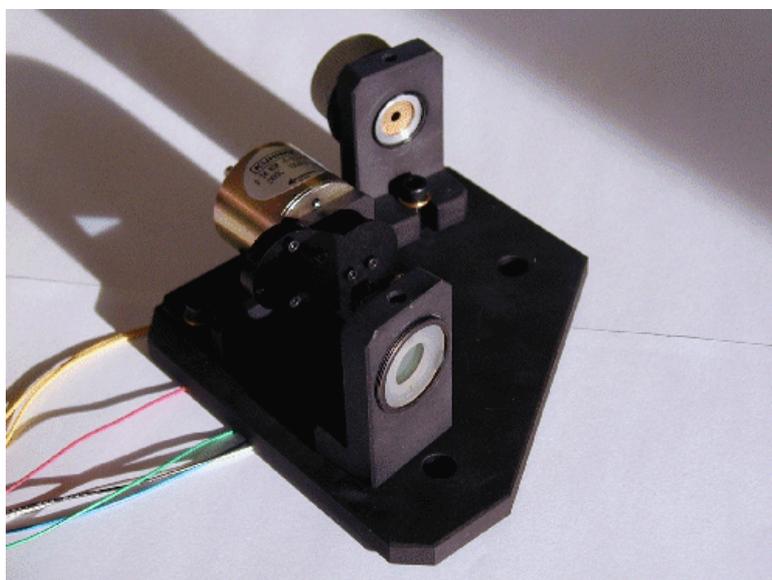


Figure 2.19 : Système de densités optiques placé dans le banc laser avant l'amplificateur double passage.

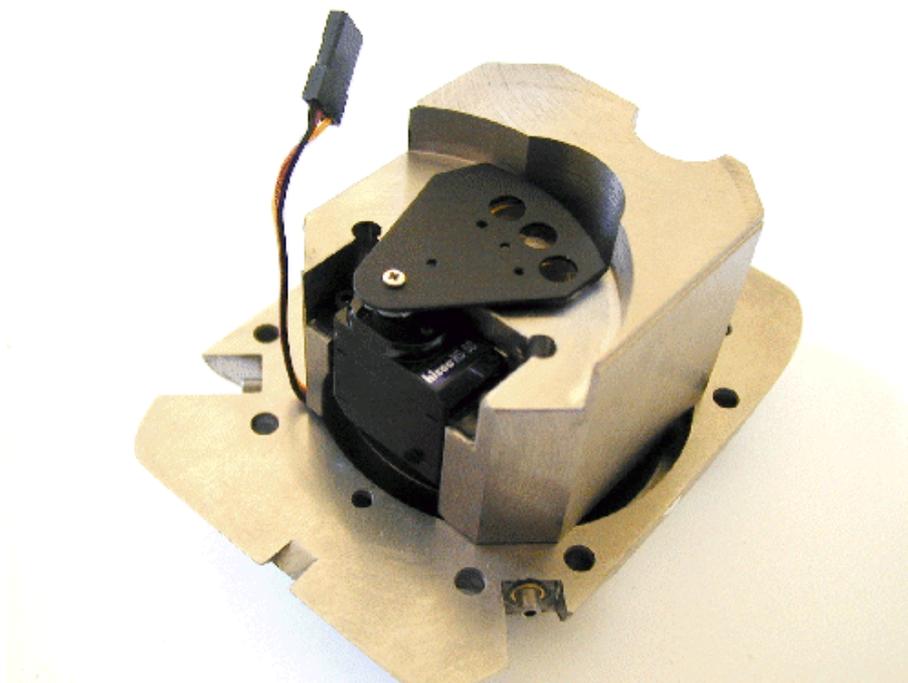


Figure 2.20 : Système rotatif de densités optiques placé dans la tourelle devant la C-SPAD.

Quelques tests ont été menés avec cette configuration d'étalonnage et une énergie laser réduite à 1 mJ :

- l'écart-type des mesures était alors meilleur que 70 ps (ce qui correspond à 1 cm en distance), avec des impulsions de 100 ps de largeur,
- la stabilité était meilleure que 20 ps (3 mm) après 30 minutes de tirs laser et aucune dépendance en azimut n'a pu être mise en évidence.

Ce type d'étalonnage est très fiable mais n'avait pu être envisagé pour la FTLRS avec les photodétecteurs de retour précédemment employés en raison de la trop grande dépendance de leur temps de transit suivant le délai entre la sensibilisation de la photodiode et l'arrivée effective des photons, problème qui n'existe plus avec une photodiode de type C-SPAD.

Dans le cas de la FTLRS, l'emploi d'un tel photodétecteur est donc indispensable pour ce type d'étalonnage. En effet, l'indépendance vis à vis du délai de sensibilisation de la photodiode selon l'arrivée des photons assurée par la C-SPAD est essentielle dans la mesure où le déclenchement de la présensibilisation de la photodiode n'a pas une stabilité excellente. En effet, pour les mesures d'étalonnage, le déclenchement de la sensibilisation du photodétecteur de retour se fait à partir des résidus des impulsions laser du demi-train précédant l'impulsion la plus énergétique (voir Figure 2.11). Ainsi, la photodiode est effectivement sensible au moment de l'arrivée des photons revenant de la cible d'étalonnage. L'instabilité du temps de déclenchement peut atteindre 200 ns. Cependant, cette instabilité n'existe pas pour les passages de satellites puisque le déclenchement de la présensibilisation se fait alors sur l'impulsion d'amplitude maximale.

3.3. Rattachement géodésique

Le plateau de Calern est également équipé de cibles fixes d'étalonnage externe qui servent à contrôler la qualité et l'exactitude des mesures. Ces cibles sont situées à des distances de 330 m, 1,5 km, 2,5 km et 8 km¹ et se trouvent dans des directions différentes ; des cibles multiples sont notamment utiles pour connaître le point de référence du télescope.

Il est nécessaire de procéder régulièrement à des vérifications métrologiques (environ une fois par an) et occasionnellement (tous les 2-3 ans) il faut veiller au raccordement de la croisée des axes aux repères locaux ainsi qu'à la vérification des distances des cibles externes. Des campagnes géodésiques locales ont été menées en 1998 et 1999 à l'observatoire du plateau de Calern par l'IGN afin de rattacher les différents instruments géodésiques entre eux et de vérifier les distances des cibles d'étalonnage utilisées par les stations laser. L'uniformité des résultats est généralement au niveau centimétrique ou sub-centimétrique.

Dans ce travail, principalement axé sur la recherche de performances ultimes des systèmes laser, il me semble important de mentionner quelques points fondamentaux concernant ces rattachements géodésiques. Ainsi, il faut :

- considérer les aspects de conception du réseau local, d'accessibilité du point de référence laser et des cibles,
- déterminer les vecteurs d'excentricité entre les points à rattacher, faire le lien avec l'ITRF et les systèmes de référence nationaux,
- réaliser les marques au sol,
- définir des recommandations sur la fréquence des vérifications et des spécifications d'exactitude (aussi proche du millimètre que possible),
- la technique et les logiciels de réduction et d'ajustement, la conception du support des cibles, la réalisation de la dalle, etc. sont également à prendre en considération, en plus de la méthode d'étalonnage et de son instrumentation associée.

3.4. Importance de l'étalonnage dans la recherche d'une exactitude centimétrique

3.4.a Conditions de mesures

Un autre aspect essentiel dans la qualité de l'étalonnage concerne les conditions de l'exécution des mesures. Une des difficultés de l'étalonnage est de faire, avec la même station laser, la mesure d'une très courte distance donnée au niveau du sol, tout en gardant la même exactitude que pour les mesures dans l'espace sur des distances extrêmement grandes (300 à 20 000 km). Or, il est indispensable que les conditions physiques de la mesure soient les plus équivalentes possibles à celles des passages de satellites. Il ne faut donc pas faire les mesures d'étalonnage trop loin du niveau de détection du simple photo-électron et penser par exemple à faire l'étalonnage avec toujours la même divergence de faisceau laser. En effet, les erreurs du système d'étalonnage sont profondément liées aux sources d'erreur de chronométrie, de chemin optique (problèmes d'alignements optiques et mécaniques), de traitement des données de correction atmosphérique, de stabilité de l'environnement instrumental...

Un étalonnage correct nécessite donc d'être réalisé dans des conditions équivalentes pour la détection du signal provenant des cibles au sol et de celui provenant des satellites. Cependant, l'équivalence

¹ Cible trop éloignée pour être utilisée en contrôle d'exactitude (problèmes de modélisation de la correction atmosphérique).

entre les deux n'est jamais parfaitement réalisée, ce qui peut constituer une source d'erreur et de biais supplémentaire.

Pour les cibles lointaines, les effets de la propagation atmosphérique compromettent la mesure de distance à la cible¹. De petits changements aléatoires dans la verticalité de la cible peuvent aussi induire des biais significatifs dans la valeur de l'étalonnage. Des erreurs dans le suivi du mouvement du pilier d'ancrage de la station ainsi que dans la détermination des excentricités du système sont également à prendre en compte.

3.4.b Contrôle de la qualité des mesures

A l'aide des mesures d'étalonnage, on peut réaliser une première évaluation de la qualité des observations au niveau des stations. Ainsi, afin de contrôler l'instrumentation, on peut étudier d'un passage à l'autre l'évolution de la valeur d'étalonnage et de son écart-type. Il est possible de faire un histogramme des valeurs d'étalonnage pour le suivi de son évolution, mais la valeur de cet étalonnage fluctue de jour en jour, notamment en raison des modifications de la météorologie. Il faut également tenir compte des problèmes de dérives de température des différents constituants, des changements de réglage notamment du laser.

Néanmoins, la stabilité de la valeur d'étalonnage renseigne sur la qualité de la station considérée. Par exemple, au plateau de Calern, la stabilité d'un passage à l'autre est d'environ 2 mm pour la station laser satellites fixe et d'environ 8 mm pour la station laser Lune. Pour ces deux mêmes stations, la stabilité sur plusieurs jours se situe respectivement aux niveaux de 2 cm et de 1 cm.

Un autre moyen de contrôle provient de l'analyse des résidus laser eux-mêmes. Pour illustrer ce point, on peut mentionner le cas de la station laser Lune pour laquelle, suite à l'analyse des observations des satellites LAGEOS (analyse détaillée dans le Chapitre 3), un biais a été décelé. En effet, en dépit d'un étalonnage en temps réel, il s'est avéré que la valeur de la distance d'étalonnage était erronée jusqu'à juin 1997, d'où l'existence d'une limitation dans les méthodes de vérification de la distance d'étalonnage employées jusqu'alors. L'analyse des données obtenues sur satellites, conjointement avec la station laser satellites fixe, a ainsi révélé l'existence d'un biais instrumental systématique de 9,87 cm dans les mesures de la station laser Lune, valeur qui a été estimée à 9,89 cm par des mesures expérimentales. Ceci indique qu'un étalonnage interne sert surtout à vérifier la stabilité ou à déceler des modifications instrumentales, mais cela ne donne jamais une valeur exacte de la distance d'étalonnage. Les mesures sur des cibles externes à quelques centaines de mètres, et a fortiori sur des cibles encore plus proches (par exemple rétro-réflécteur placé devant ou dans le télescope), donnent l'exactitude nécessaire.

Par conséquent, une attention particulière doit être portée à la méthode d'étalonnage employée, notamment dans le cas d'une station telle que la station laser Lune dont les dimensions font que les différents éléments ne sont pas situés au même endroit. Ainsi, lorsqu'un étalonnage interne est employé, un étalonnage externe doit être auparavant réalisé afin de mesurer la distance d'étalonnage interne. Puis celle-ci, supposée constante, doit tout de même être vérifiée régulièrement.

D'autre part, cet exemple illustre non seulement l'importance considérable de la participation de l'analyse des observations laser au contrôle de leur qualité, mais surtout d'une communication entre les différents centres d'analyse et les différentes stations d'observations, dialogue désormais indispensable en vu des performances recherchées, dialogue établi grâce à l'ILRS.

¹ A une distance de 3 km, la correction liée à la propagation dans l'atmosphère peut induire une erreur de 3 cm sur la valeur de l'étalonnage.

3.4.c Quelques recommandations

L'étalonnage constitue dorénavant un point crucial pour progresser dans la qualité des mesures laser. Afin d'illustrer l'importance de ce problème, on peut mentionner le colloque organisé par l'ILRS spécialement à ce sujet à Florence en septembre 1999. Certains aspects importants évoqués au cours de ce colloque n'ont pas encore permis de répondre aux questions qui suivent, mais il a permis par exemple de mettre en exergue l'ampleur de ce sujet et de faire le point sur ce qui se fait à ce propos au niveau des différentes stations laser.

- Quels sont les problèmes les plus couramment rencontrés avec l'utilisation de cibles locales, dans différentes configurations instrumentales ?
- Quelle doit être la distance maximale d'une cible d'étalonnage externe afin d'éviter les problèmes des corrections atmosphériques ?
- Quelle serait la recommandation pour chaque type de station ?

La nécessité de rattacher régulièrement la croisée des axes des télescopes à des points géodésiques précis et de mesurer la distance d'étalonnage par des moyens complètement indépendants de la télémétrie laser a également été abordée.

D'autre part, il faudrait aboutir à l'établissement de critères sur la fréquence et la durée des mesures d'étalonnage et probablement élaborer une procédure d'étalonnage quasiment commune à toutes les stations, en adéquation avec le type de station afin d'homogénéiser les résultats. Cependant, il ne faudrait pas tout standardiser afin de conserver la diversité des instrumentations ainsi que la possibilité de faire des comparaisons et de détecter des systématismes qui pourraient être liés à un certain type de configuration.

Une bonne caractérisation des différentes méthodes d'étalonnage et des résultats obtenus est aussi nécessaire, de façon à pouvoir déterminer ce qui produit de mauvais résultats et pourquoi. Il faut par exemple considérer avec attention les capteurs météorologiques (étalonnage du capteur de pression, périodicité des mesures prises en compte au cours d'un passage...).

Il faudrait aussi être capable de dire comment les valeurs actuelles d'étalonnage sont utilisées en tant que correction de distance (interpolation dans le temps, filtrage, lissage...). Des changements de longueur du chemin optique dans le télescope entre la direction de la cible d'étalonnage et la direction du satellite sont à considérer. La nécessité d'une surveillance des cibles (avec des corrections de longueur de chemin optique mesurées) par rapport à des cibles fictives à l'intérieur du système a également été évoquée. Enfin, les principaux avantages et inconvénients de l'un ou de l'autre type d'étalonnage, ou le besoin de disposer des deux ont fait l'objet de discussions.

Une attention particulière doit être portée à :

- la dépendance en azimut et hauteur,
- la vérification des variations de la largeur du faisceau laser,
- la flexibilité de la méthode (changements rapides dans les délais du système),
- schéma d'étalonnage dépendant du satellite,
- la fiabilité et à la capacité d'étalonner quelles que soient les conditions météorologiques.

La dépendance de la valeur d'étalonnage selon la température ambiante, le réglage du laser et les alignements optiques est également à considérer. Par exemple, dans le cas de la station laser satellites fixe du plateau de Calern, la valeur d'étalonnage augmente de 1 cm environ durant la première heure

de fonctionnement, en raison du chauffage du chronomètre et de l'électronique des détecteurs. Ensuite, la distance d'étalonnage est stable au niveau de 2 mm. Afin d'éviter cette dérive liée à la mise en route de la station, il faudrait que toute l'instrumentation fonctionne en permanence, mais cela est impossible en raison des risques d'orages sur le site de l'observatoire. La dépendance en azimut de la distance d'étalonnage est d'environ 2-3 mm sur un tour et celle en hauteur est du même ordre de grandeur sur 90°. Enfin, le réglage du laser peut avoir un effet jusqu'à 2 cm, mais ceci est en principe totalement compensé par les mesures d'étalonnage puisque le réglage du laser ne varie pas entre les passages de satellites et les mesures d'étalonnage.

L'étude des systèmes d'étalonnage est également liée à la conception des cibles. Ainsi, il faut tenir compte des problèmes de stabilité environnementale (vent...), de stabilité optique, de capacité de mesure de la distance entre la cible et le point de référence de la station laser (par exemple par un relevé au sol), de capacité de remplacement ; les considérations de sécurité et de distance ne sont pas à oublier.

D'autre part, le problème de la signature du satellite n'est pas pris en compte dans l'étalonnage bien que l'impulsion laser puisse être plus ou moins déformée selon le satellite observé. Dans le cas de T2L2 par exemple, l'étalonnage sera fait par un simulateur de la signature du satellite afin qu'il y ait adéquation entre la valeur d'étalonnage et l'exactitude de l'instrument [Samain, 2000].

De plus, la réponse de la chaîne de chronométrie et de l'électronique en général n'est probablement pas la même pour un passage de satellite que pour les mesures d'étalonnage. Pour ces dernières, le laser vient en effet juste de tirer au moment du retour des photons, d'où l'existence de perturbations électromagnétiques. Cet effet est probablement faible dans le bilan d'erreur instrumentale global, mais il mériterait d'être mesuré.

Un grand nombre de questions restent encore à aborder. Ces dernières montrent qu'il faut tenir compte de beaucoup de facteurs afin d'atteindre l'objectif d'une exactitude de 1 cm ou mieux. Nous pouvons citer quelques unes de ces questions :

- Il faudrait, par exemple, tenir compte des variations de la forme du front d'onde du faisceau laser liées à une diminution de l'énergie du laser entre les passages de satellites et les mesures d'étalonnage laser [Degnan, 1999],
- On peut également s'interroger sur la nécessité d'un étalonnage tir à tir et sur la fréquence optimale des mesures d'étalonnage.

La réponse à ces interrogations, ainsi que les résultats des mesures d'étalonnage, dépendent de la méthode d'étalonnage employée, de la stabilité des chronomètres... Ainsi, d'après [Luck, 1999], une fréquence d'étalonnage de 3 à 5 mn serait adaptée en journée et une fréquence nocturne moins élevée suffirait puisque l'atmosphère est beaucoup plus stable la nuit. D'autres facteurs à prendre en compte sont la nature des coins de cube (pleins ou creux), la ligne de visée sous laquelle se trouvent les cibles d'étalonnage, ainsi que des effets anormaux de réfraction ou de parallaxe, la portion du faisceau laser réfléchi par le rétro réflecteur...

Toutes ces précautions peuvent paraître complexes, voire jeter le doute sur les capacités de la télémétrie laser. Néanmoins, les ingénieurs et techniciens de la géodésie classique sont entraînés à la rigueur métrologique quotidienne nécessaire et sont tout à fait à même de les mener à bien. On est souvent conduits à imaginer des solutions techniques pragmatiques dont la qualité est confirmée par l'expérience elle-même.

4. Sources d'incertitude instrumentales et améliorations apportées à la FTLRS en vue de l'obtention d'une exactitude centimétrique

4.1. Introduction

Le principe de la télémétrie laser est simple mais bien des problèmes délicats se posent avant d'atteindre l'exactitude centimétrique tant cherchée.

Tout d'abord, pour des cibles lointaines, il faut tenir compte de la réfraction dans l'atmosphère qui dépend de la pression, de la température et du pourcentage d'humidité ainsi que de la longueur d'onde et de l'élévation de la cible (épaisseur d'atmosphère traversée). La correction sur la distance est de quelques mètres à la verticale et s'élève à une dizaine de mètres à 15° de hauteur. Ce point sera étudié dans la partie 5.2. de ce chapitre.

D'autre part, compte tenu de l'atténuation du faisceau laser par l'atmosphère, de la faible proportion de lumière retournée par le rétro réflecteur et du fait que le système de détection perçoive aussi d'autres photons provenant du fond du ciel, le signal attendu est très faible et peut être noyé dans le bruit environnant. Il est donc nécessaire d'avoir un détecteur très sensible (quelques photons doivent être détectables) et de disposer d'un système de filtrage du bruit. C'est ce que nous verrons dans la partie 4.3.

Enfin, compte tenu de la mobilité des cibles spatiales, la station doit être équipée d'un dispositif de poursuite adapté.

De plus, les temps de trajet aller et retour ne sont pas égaux puisque le satellite s'est déplacé entre l'instant de départ et l'instant de retour des photons. Il faut donc pouvoir déterminer la distance de la cible spatiale à un instant donné. Le système de poursuite étant mobile, il est nécessaire de disposer d'un point de référence, d'où l'importance de la notion d'étalonnage que nous venons de développer.

L'analyse des données de l'expérience de terrain à Ajaccio (octobre 1996 – février 1997) a montré que 80 % des passages ont été mesurés avec une précision de 2 cm (dispersion des résidus laser). Cependant, 20 % des données acquises pendant cette période étaient insatisfaisantes (instabilité d'un passage à l'autre des valeurs de l'étalonnage, des résidus laser et de leur écart-type). Ces instabilités ont parfois aussi été relevées au cours d'un même passage. Après avoir cherché d'éventuelles corrélations entre ces variations, les différentes sources d'instabilité possibles ont été recensées. Les différents paramètres qui peuvent influencer la qualité des mesures laser sont : la variabilité de la largeur et de la forme des impulsions laser, la qualité du chronomètre utilisé, la géométrie station-satellite, l'influence de la couronne des rétro réflecteurs dans le cas de T/P, la stabilité de la valeur d'étalonnage, les corrections troposphériques appliquées, les erreurs d'orbite et de coordonnées de station, le temps de réponse du détecteur, le niveau d'énergie des échos laser de retour... Après comparaison avec les données des stations laser de Grasse, Graz (Autriche) et Herstmonceux (GB), il est ressorti que les instabilités étaient probablement majoritairement liées à des problèmes instrumentaux [Stoufs, 1997], [Nicolas et al., 1998].

Par conséquent, depuis le retour de la FTLRS de cette campagne probatoire en Corse, d'importantes modifications techniques ont été apportées à cette station pour surmonter les difficultés rencontrées durant cette expérience de terrain, mais surtout pour améliorer les performances de la station. Ainsi, on espère atteindre l'exactitude centimétrique requise pour l'étalonnage de JASON-1 et ENVISAT. Ces aménagements sont aussi en partie liés à l'expérience T2L2. Enfin, l'objectif est également de doter cette station de la possibilité de télémétrer des satellites jusqu'à 10 000 km de distance, notamment afin d'atteindre les satellites LAGEOS-1 et -2 permettant la qualification d'une station laser par comparaison avec d'autres instruments du réseau laser global.

Le niveau d'exactitude centimétrique semble pouvoir être atteint à condition d'apporter certaines modifications à l'instrument. Les améliorations techniques concernent à la fois l'optique,

l'électronique, l'informatique ainsi que les aspects mécaniques. Tous ces travaux sont résumés dans cette partie. Ils concernent en particulier :

- l'amélioration de la précision par l'utilisation de photodiodes plus rapides aussi bien pour le départ que pour la réception,
- l'installation d'un système de correction du délai de transit des signaux dans le détecteur en fonction du niveau de photons en retour et de l'effet centre-bord,
- les liaisons réseau TCP/IP entre l'automatisme VME et l'ordinateur de contrôle,
- des modifications logicielles,
- l'adaptation d'un nouveau système d'étalonnage semblable à celui utilisé par la station fixe,
- l'installation d'un obturateur électro-optique pour éviter l'éblouissement du détecteur de retour au moment des tirs laser.

Il faut bien préciser à ce niveau que nous devons faire face à des difficultés supplémentaires liées à la taille de la station. En effet, la mise en œuvre de la plupart de ces modifications induit des difficultés liées à l'extrême compacité de l'instrument. Cet aspect replace bien la FTLRS dans le contexte d'un réel défi technologique.

Cette partie traite de l'importance de différents éléments d'une station laser en termes de contribution à la qualité des mesures. Ainsi, les problèmes d'incertitudes instrumentales liées au laser, au système de détection, à la chaîne de chronométrie et au système de poursuite sont étudiés. Parallèlement, les évolutions technologiques apportées à la FTLRS concernant chacun de ces aspects contribuant au bilan d'erreur afin de s'orienter vers une exactitude centimétrique des observations sont présentées.

4.2. *Le laser*

4.2.a *Qualités requises pour l'émetteur laser*

Le laser est un des éléments de base d'une station de télémétrie laser. Les lasers sont des dispositifs capables d'émettre un étroit faisceau de lumière cohérente. L'effet laser¹ est basé sur l'amplification de la lumière par le processus d'émission stimulée : l'amplification de la lumière incidente est réalisée par la production de photons ayant la même énergie, la même phase et la même direction que les photons incidents, d'où la production d'un rayonnement cohérent. Une onde lumineuse effectue toute une série d'aller-retour dans un milieu amplificateur riche en atomes excités et placé entre deux miroirs : la cavité résonnante. Les caractéristiques principales du rayonnement laser sont : la directivité due à la cohérence spatiale de la source elle-même, la possibilité d'émettre des impulsions lumineuses extrêmement brèves, l'obtention de très fortes puissances et la finesse spectrale ou cohérence temporelle (voir par exemple [Dettwiller, 1998]). Ces propriétés sont justement essentielles pour les mesures de télémétrie laser.

Les éléments constitutifs d'un laser sont un oscillateur optique, un milieu amplificateur de lumière pour entretenir les oscillations et un dispositif de pompage pour rendre ce milieu amplificateur. Dans le cas d'un laser Nd:YAG, comme pour la plupart des stations de télémétrie laser du réseau mondial, l'inversion de population se fait par excitation optique du milieu amplificateur en employant des photons provenant de flashes lumineux.

¹ LASER pour « *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* ».

Compte tenu du bilan de liaison très faible, l'emploi de lasers puissants est indispensable en télémétrie laser, d'où l'utilisation de lasers pulsés comme les lasers Nd:YAG. La technique de télémétrie laser requiert des impulsions aussi courtes que possible tout en ayant l'énergie nécessaire pour pouvoir télémétrer des cibles lointaines. Des lasers fonctionnant en mode bloqué (*Q-switched*), produisant des impulsions de 10^{-10} s de largeur ou moins sont utilisés. Chaque tir laser est composé d'un train d'impulsions ayant en moyenne une forme gaussienne (voir Figure 2.8 et Figure 2.10) dont la largeur et la forme peuvent varier légèrement à cause d'inhomogénéités de température dans la cavité laser. En pratique, seul un demi-train d'impulsions (sélectionné à l'aide d'un découpeur) est envoyé vers la cible (voir Figure 2.11). Cela offre les avantages d'augmenter le nombre de retours¹ et de permettre d'avoir beaucoup moins d'énergie par impulsion ainsi qu'une estimation simple en temps réel du niveau du signal de retour.

Le laser Nd:YAG figure parmi les plus puissants, mais il n'a qu'un rendement de 3% maximum. Comme en télémétrie laser il fonctionne continûment sur de longues périodes de temps (plusieurs heures), il est nécessaire de refroidir le cristal du milieu amplificateur ainsi que les lampes de pompage². D'où l'intérêt de disposer d'un système de refroidissement efficace.

Les lasers Nd:YAG sont des lasers à blocage de mode. La durée entre deux impulsions lumineuses successives est égale au temps mis par la lumière pour effectuer un aller-retour dans la cavité laser. Le taux de répétition des trains d'impulsions est égal à la différence de fréquence entre deux modes consécutifs d'oscillation de la cavité laser. D'après la théorie des lasers, pour mettre en phase les différents modes, on place un absorbant saturable dans la cavité. Il s'agit d'un milieu absorbant qui présente facilement le phénomène de saturation de l'absorption : au-delà d'une certaine énergie presque tous les photons pris au faisceau par absorption sont réémis par émission stimulée qui compense l'absorption. On obtient alors des impulsions suffisamment brèves pour que le temps de vol aller-retour entre l'émetteur et la cible soit précisément défini.

La puissance crête émise P_e s'écrit, en fonction de l'énergie par impulsion E_e et de la durée de l'impulsion à mi-hauteur T_L : $P_e = \frac{E_e}{T_L}$. La puissance reçue P_r s'écrit $P_r = \gamma P_e$, où γ est le bilan de liaison. Ce dernier représente la relation existante entre l'énergie reçue par le détecteur et l'énergie optique émise par le laser. Cette relation s'écrit [Degnan, 1993] :

$$n_{pe} = \eta_q E_T \frac{\lambda}{hc} \eta_t G_t \sigma_{sat} \left(\frac{1}{4\pi R^2} \right)^2 A_r \eta_r T_a^2 T_c^2$$

avec $R = -(R_T + h_t) \cos \theta_{zen} + \sqrt{(R_T + h_t)^2 \cos^2 \theta_{zen} + 2R_T(h_s - h_t) + h_s^2 - h_t^2}$ et

$$G_t = \frac{8}{\theta_t^2} \exp \left[-2 \left(\frac{\theta}{\theta_t} \right)^2 \right]. \text{ Les variables utilisées sont :}$$

n_{pe} le nombre de photo-électrons détectés,

η_q l'efficacité quantique du détecteur,

E_T l'énergie de l'impulsion laser,

λ la longueur d'onde du laser,

h la constante de Planck,

¹ Généralement, on additionne les différentes impulsions du demi train revenant de la cible, les différentes impulsions étant séparées d'une quantité connue (longueur de la cavité laser).

² En pratique ceci est réalisé par une circulation d'eau autour des barreaux de Nd:YAG.

c la vitesse de la lumière dans le vide,
 η_t l'efficacité de l'optique d'émission,
 G_t le gain de l'émetteur,
 σ_{sat} la section efficace optique du satellite,
 R la distance angulaire de la cible,
 A_r la surface effective de l'ouverture du télescope de réception,
 η_r l'efficacité de l'optique de réception,
 T_a la transmission atmosphérique en aller simple,
 T_c la transmission en aller simple des cirrus (quand il y en a),
 RT le rayon de la Terre,
 h_t l'altitude de la station au-dessus du niveau de la mer,
 h_s l'altitude du satellite au-dessus du niveau de la mer,
 θ_{zen} l'angle zénithal du satellite observé depuis la station (angle complémentaire de la hauteur du satellite),
 θ_i la divergence du faisceau laser,
 θ l'erreur de pointé.

L'énergie d'une impulsion laser n'est pas centrée en un instant mais distribuée dans un court intervalle. L'erreur induite par cet effet est aléatoire et dépend de la largeur à mi-hauteur τ_i des impulsions laser et du nombre de photons reçus N_r :

$$\sigma_{largeur\ laser} = \frac{k_i \tau_i}{\sqrt{N_r}}, \text{ où } k_i \text{ est un coefficient dépendant de la détection [Jiyu, 1986].}$$

Il existe une erreur liée à la distorsion du front d'onde d'un faisceau laser transmis et réfléchi. Le signal de retour est un ensemble de réflexions provenant de tous les rétro réflecteurs faisant face à la direction générale de la station de télémétrie. Les lasers opèrent dans le mode fondamental TEM₀₀, ce qui produit la plus faible divergence de faisceau, la plus grande densité d'énergie et donc la plus haute brillance. De plus, le profil d'intensité radiale est uniforme et monophasé. Ainsi les laser Nd:YAG à blocage de mode ne présentent pas de distorsion du front d'onde.

Une erreur supplémentaire est due à la fluctuation de puissance des impulsions laser revenant des satellites élevés (plusieurs milliers de kilomètres d'altitude). Ces variations d'amplitude du signal peuvent varier aléatoirement et produire des biais. Lorsque les systèmes de télémétrie laser fonctionnent au niveau du simple photo-électron, l'effet lié aux variations du niveau de retour affectant l'étalonnage et les données de poursuite de satellite n'est plus significatif.

En complément d'un contrôle de la température et de l'humidité du banc laser, l'alignement et la puissance du laser, la stabilité de l'électronique etc. doivent également être impérativement sous contrôle, de façon à minimiser les effets sur la propagation du front d'onde. Les erreurs dans les mesures de distances peuvent être importantes (supérieures à la précision recherchée) si l'environnement du laser n'est pas maintenu stable.

L'avenir de la télémétrie laser réside probablement dans le développement de lasers Titane-Saphir (0.9-0.4 μm , comme dans le cas de TIGO), qui sont certes plus complexes mais utiles pour résoudre les problèmes de correction de propagation dans l'atmosphère (télémétrie laser deux couleurs).

Une autre voie d'évolution se trouve dans les lasers non dangereux pour les yeux, soit par leur énergie (cas de SLR2000), soit par leur longueur d'onde d'émission. En effet, une longueur d'onde voisine de 1,5 μm correspond à une bande d'absorption du liquide oculaire.

Cependant, le problème de la faible sensibilité des détecteurs à cette longueur d'onde reste encore posé.

4.2.b Améliorations apportées au laser de la FTLRS

CHANGEMENT DE LA LONGUEUR D'ONDE D'EMISSION DU LASER

La première amélioration importante apportée au laser de la FTLRS concerne le changement de la longueur d'onde d'émission en passant de l'infrarouge (mode fondamental d'un laser Nd:YAG) au vert. Cette modification a été réalisée par l'insertion, sur le banc laser, d'un cristal anisotrope (KDP) afin de doubler la fréquence de l'onde lumineuse le traversant. Ainsi, à la sortie du KDP, 50% de l'énergie sort en infrarouge ($\lambda=1064$ nm) et l'autre moitié est émise en vert ($\lambda=532$ nm) (voir Figure 2.9).

Lorsque le projet FTLRS a été lancé, le cahier des charges était tel que l'instrument puisse travailler dans l'une des deux longueurs d'onde suivantes : le mode fondamental dans l'infrarouge (1064 nm) et le 2^{ème} harmonique dans le vert (532 nm). Ainsi, très peu de modifications sont nécessaires pour passer de l'une à l'autre. Après plusieurs campagnes d'observations menées en utilisant le mode infrarouge, la longueur d'onde verte a été adoptée car les détecteurs disponibles à cette longueur d'onde sont bien meilleurs en termes à la fois d'efficacité quantique (environ 15 % en vert au lieu de quelques % en IR), de rapport signal/bruit et de temps de transit. Le mode infrarouge offre 4 fois plus de photons et une meilleure transmission atmosphérique dans certaines conditions, mais ces propriétés intéressantes sont totalement compensées par la diffraction sur le rétro réflecteur des satellites. D'autre part, cette évolution était indispensable pour l'expérience de Transfert de Temps par Lien Laser (T2L2) puisque le détecteur qui sera utilisé pour cette expérience a été conçu pour le vert, longueur d'onde la plus couramment utilisée dans la communauté de la télémétrie laser. Comme la majeure partie de l'optique de la FTLRS est traitée pour ces deux longueurs d'onde, les seuls changements importants nécessaires pour passer dans le vert consistent en l'insertion sur le banc laser d'un cristal anisotrope doubleur de fréquence (KDP) et en l'installation d'un nouveau détecteur des échos de retour plus sensible et plus rapide que dans la première version de la FTLRS.

DIMINUTION DE LA LARGEUR DES IMPULSIONS LASER

Après des réglages optiques (cavité laser, arrivée en faisceau parallèle sur le KDP, maximum d'intensité de la lumière au centre du KDP, réglage du coudé), j'ai réalisé des premières mesures de la largeur d'impulsion du faisceau laser avec E. Samain en 1998. Pour ce faire, une caméra à balayage de fente a été utilisée et une largeur d'impulsion laser d'environ 80 ps a été obtenue. Cette valeur était stable, mais au-delà de 15-30 minutes, la puissance et la largeur d'impulsion du laser avaient une légère tendance à diminuer, effet lié à une élévation de température dans la cavité laser.

Dans l'objectif d'atteindre une meilleure exactitude et suite à l'installation d'une nouvelle photodiode, la C-SPAD (voir paragraphe 4.3.b.), nous avons été amenés à diminuer la largeur des impulsions laser par le changement du Fabry-Perot. Ainsi, la largeur des impulsions est passée d'une centaine de picosecondes à 35 ps. Cette diminution est notamment indispensable car le détecteur et son électronique de compensation des effets de variation du temps de transit ne fonctionnent pas de façon optimale lorsque les impulsions laser ont des largeurs supérieures à 50 ps.

REGULATION THERMIQUE DU LASER

Une diminution de la puissance avec le temps de fonctionnement du laser a été mesurée ainsi que des variations de la largeur d'impulsion. Ces instabilités étaient liées à des problèmes de température. Une étude du système de régulation thermique a donc été menée en mesurant, en fonction du temps et des consignes de température demandées au groupe de régulation, la température de l'eau dans le groupe, la température de l'eau circulant dans le laser, celle de la tête laser (l'extérieur du corps de la tête, le barreau étant dans l'eau) ainsi que la température du banc laser. Ce sont les flashes qui influent le plus sur la température de la tête laser. La température de l'eau est bien régulée, mais celle du banc laser monte en fonction de la température ambiante du laser. Des écarts entre les consignes et la température de la tête laser ont été observés, mais après 1h30 de fonctionnement, la température de la tête laser était bien stabilisée à la température demandée. La climatisation de l'eau se faisait entre 35 et 40°C, ce qui était insuffisant pour un fonctionnement continu d'une heure et/ou dès que la température extérieure atteignait 20°C.

D'autre part, il est apparu que ce groupe frigorifique présentait une panne liée à la commande des résistances chauffantes (régulation de l'eau prévue à environ 40°C). Le système de refroidissement comporte des capteurs de température et de pression pour des problèmes de sécurité. On en a déduit que, en dépit de sa panne, le groupe de refroidissement initial était insuffisant pour assurer la stabilité du faisceau laser, concernant à la fois l'énergie et la forme des impulsions.

De plus, des mesures de la température de l'électronique de l'alimentation du laser ont montré que le niveau limite donné par le constructeur (Quantel), 60°C, était atteint. Puis, l'alimentation du laser est tombée en panne après plus d'une heure et demie de fonctionnement continu, probablement parce qu'il n'y avait plus les échanges thermiques suffisants pour évacuer la chaleur (système caléoduc).

Un autre groupe de régulation thermique permettant de faire varier la température de l'eau à la température désirée a donc été installé. Il apparaît qu'une bonne vingtaine de minutes est nécessaire pour que la température de l'eau atteigne la valeur souhaitée. La température idéale semble être de l'ordre de 30°C afin que la différence de température entre la tête laser et l'extérieur ne soit pas trop importante et donc éviter tout problème de condensation sur les faces des barreaux de Nd:YAG. Cependant, on aura des informations plus importantes et donc des contraintes plus fortes sur les spécifications thermiques quand nous disposerons des mesures de largeur d'impulsions laser en fonction de la température.

Des efforts seront aussi à réaliser sur la régulation thermique du banc laser lui-même¹, point pour lequel la compacité de la station est un avantage certain.

¹ La température du banc peut monter de 0 à 35°C en extérieur car il chauffe naturellement avec les éléments optiques, électroniques...

AUGMENTATION DE LA STABILITE OPTO-MECANIQUE DU BANC LASER

De nombreuses modifications opto-mécaniques ont été apportées au banc laser afin de le rendre plus stable aux niveaux mécanique et optique. Ainsi, on a une meilleure stabilité du laser et des impulsions grâce à la suppression de tous les porte-à-faux en installant des platines en aluminium apportant une meilleure stabilité et une possibilité de réglage des différents éléments du banc laser. Ceci a permis de résoudre des problèmes d'instabilité liés à l'ajout de nombreux éléments optiques depuis la conception du laser de la station.

Ainsi, l'obturateur permettant de placer des densités optiques avant l'amplificateur double passage pour faire l'étalonnage avec un niveau du laser adapté au problème a été amélioré, notamment aux niveaux de la sécurité et de l'automatisation (voir Figure 2.19).

Le système acousto-optique permet de stabiliser le train d'impulsions. Sa fréquence doit correspondre au temps aller-retour de l'impulsion dans la cavité. Il faut alors pouvoir ajuster la longueur de la cavité et la fréquence de manière cohérente. Jusqu'à présent, seule la fréquence était réglable, mais en pratique, comme il s'agit d'un cristal, on a seulement accès à des modes. On ne pouvait donc agir que sur 0,1% de cette fréquence, ce qui correspondait à 1 mm sur la longueur de la cavité laser, ce qui était insuffisant.

Au cours de tests réalisés après l'installation du nouveau Fabry-Perot, il est apparu que l'acousto-optique ne servait plus à rien puisque tout était identique, qu'il soit allumé ou non : la fréquence ne correspondait en effet absolument plus à la longueur de la cavité laser en raison d'un dérèglement important de la cavité laser à ce moment-là. On a donc modifié le support de la cuve à colorant saturable de manière à avoir la possibilité de la déplacer selon 4 réglages : on peut désormais agir sur la longueur de la cavité, l'orientation du miroir selon deux axes et l'alignement. Ces réglages se font avec une fréquence fixe de l'acousto-optique et permettent d'effectuer une translation de la cuve à colorant pour pouvoir la décaler au cas où elle serait abîmée (piquée).

L'afocal de sortie du laser a été déplacé derrière le doubleur de fréquence plutôt que devant comme il l'était initialement. Ainsi, on a un faisceau d'un diamètre plus grand avec toute l'énergie, ce qui est moins dangereux (c'est la densité d'énergie qui importe). Le vert et l'infrarouge sont séparés avec une lame dichroïque et le rayonnement infrarouge est envoyé sur le côté puis piégé dans une boîte contenant de la mousse. Ainsi, on a deux fois moins d'énergie en sortie et l'afocal est traversé par peu d'énergie.

Des pièces mécaniques ont également été réalisées pour permettre le réglage du KDP en inclinaison et donc optimiser le doublage de la fréquence d'émission du laser. La lumière est en polarisation circulaire avant le KDP, passe en polarisation rectiligne après le KDP, puis une lame quart d'onde ($\lambda/4$) permet de repasser en polarisation circulaire avant que le faisceau ne monte dans la tourelle. Ce point est important puisqu'en effet, dans le cas contraire, il y aurait des variations d'énergie du laser et de la forme de la tache selon l'orientation de la tourelle.

Enfin, un petit banc optique standard a été ajouté afin d'y installer des éléments de mesures, notamment un laser continu. Il est situé après le Fabry-Perot, ce qui permet de déterminer les deux axes de la cavité (celui vers le Fabry-Perot et celui vers l'amplificateur). Il n'est pas mis à demeure et est destiné à faire des tests et des mesures sur le laser.

Toutes ces modifications opto-mécaniques permettent d'assurer la fiabilité à la fois du laser et des réglages optiques.

4.3. Les systèmes de détection

4.3.a Spécifications requises

L'un des principaux facteurs limitant en termes d'exactitude de la mesure, après l'atmosphère, concerne la détection des photons et donc les photodétecteurs dont le rôle est de transformer les impulsions lumineuses en impulsions électriques alors acheminées vers les dateurs ou le chronomètre.

La puissance du faisceau laser décroît selon l'inverse du carré de la distance parcourue par l'onde lumineuse, donc en puissance quatre pour l'aller-retour. La puissance des lasers utilisés est de l'ordre du gigawatt et le rayonnement reçu à une distance de 100 km a une puissance de 10^{-4} W. A cela s'ajoutent les déperditions dues à l'atmosphère. La détection des échos laser nécessite donc l'usage d'une station d'observation spécialisée équipée de photodétecteurs sensibles.

En utilisant l'équation du bilan de liaison, on peut calculer l'énergie E reçue au sol pour une impulsion de durée τ et une puissance moyenne P . Le nombre moyen de photons reçus dans une impulsion est : $N = \frac{E}{h\nu}$, nombre souvent petit ou même inférieur à l'unité¹. La technique de poursuite laser nécessite donc l'utilisation de systèmes de détection très sensibles (au niveau du simple photon) et des systèmes de chronométrie capables de mesurer précisément le temps de vol aller-retour de la lumière.

Comme chaque temps d'arrivée des photons a une distribution de probabilité uniforme à l'intérieur de l'intervalle τ avec n photons détectés, on a une réduction de l'erreur de $\frac{\tau}{\sqrt{n}}$. Ainsi, il est avantageux de faire une analyse statistique utilisant des moyennes sur de nombreux tirs consécutifs pour produire les meilleures mesures de temps de vol.

Le rôle du **détecteur de départ** est d'envoyer un signal au dateur et de déclencher le chronomètre. Ce détecteur doit être rapide afin de dater très précisément le départ des impulsions laser et avoir un temps de réaction très stable afin d'obtenir une datation toujours aussi précise du départ des impulsions laser, quelles que soient les conditions, notamment au niveau de l'énergie du laser. Comme le faisceau laser est très énergétique au départ, le rendement quantique de ce détecteur n'est pas un paramètre essentiel. Le détecteur de départ doit être capable de générer un signal électrique stable à partir d'une impulsion lumineuse courte et de grande amplitude. L'écart-type temporel et la dérive du temps de transit des impulsions électriques par rapport aux impulsions lumineuses doivent être minimaux, même si le nombre de photons de l'impulsion laser à dater varie [Samain, 1995]. Le détecteur ne doit pas être sensible à l'amplitude des impulsions laser, mais sa réponse est sensible à la largeur de l'impulsion. S'il y a une variation de δt dans la largeur d'impulsion, il y a un décalage de $\delta t/2$ entre le centre de l'impulsion et la réponse électrique du photodétecteur [Samain et al., 1998].

Par contre, le **détecteur de retour** constitue un point plus critique pour la précision des données. Il doit être à la fois très sensible tout en étant le plus rapide et le plus précis possible. Le temps de transit (intervalle de temps entre l'arrivée des photons et la sortie du signal du détecteur) de ce photodétecteur doit être le plus stable possible quel que soit le nombre de photons, tout en ayant la capacité de détecter seulement quelques photons. Au niveau de ce détecteur, il est également nécessaire de limiter les bruits tant internes qu'externes. Ainsi, le photodétecteur est refroidi et on utilise un système de filtrage spatial, spectral et temporel. Le rendement du détecteur doit donc être maximal tout en assurant le minimum d'incertitude temporelle entre les deux impulsions (optique et électrique).

¹ Dans le cas de la télémétrie laser Lune, il est compris entre 0,05 et 0,1.

Cependant, le détecteur de retour est sensible à la largeur de l'impulsion laser car il travaille en simple photo-électron, d'où la nécessité d'avoir un laser aussi stable que possible et l'intérêt des modifications opto-mécaniques du banc laser entreprises et exposées précédemment.

La nécessité d'utiliser des photodétecteurs très sensibles impose de **limiter le bruit** au maximum au niveau de la détection de retour afin d'éliminer les photons parasites provenant, entre autres, du fond du ciel, des fausses détections ou du bruit interne au détecteur [Degnan, 1993]. Pour diminuer ce dernier, il suffit de refroidir le détecteur de retour. Ainsi, étant donné le faible nombre de photons revenant des cibles, et particulièrement dans le cas des cibles à faible bilan de liaison comme les satellites élevés ou la Lune, un certain nombre de dispositifs est nécessaire pour extraire du bruit les photons qui ont effectivement parcouru l'aller-retour entre la station et la cible considérée. On peut réduire le champ de vue du détecteur (filtrage spatial), la largeur spectrale du filtre passe-bande (filtrage spectral) ou le taux de fausses détections de différentes manières, notamment en réduisant la largeur de porte (filtrage temporel) ou par l'augmentation du seuil de filtrage en amplitude, par exemple, par l'utilisation d'un atténuateur variable dans le chemin du récepteur (densités optiques).

Le premier de ces dispositifs correspond à un **filtrage spatial** réalisé avec un diaphragme.

On diminue le champ de vue en plaçant un diaphragme au foyer du télescope ou devant le photodétecteur de retour. Ce filtrage spatial permet l'élimination des photons ne provenant pas exactement de la direction de la cible. Son champ de vue peut varier de plusieurs dizaines de secondes d'arc pour les observations de nuit à quelques secondes d'arc pour les poursuites de jour. La qualité du guidage du télescope ainsi que la turbulence atmosphérique limitent ce filtrage. La taille de la partie sensible du détecteur limite également l'ouverture maximale du diaphragme. Il n'est pas toujours intéressant d'utiliser le plus petit diaphragme, puisque lorsque le bruit est faible, il vaut mieux ne pas réduire le diaphragme mais plutôt augmenter la divergence du faisceau laser émis afin d'acquérir des mesures même dans le cas fréquent où la cible n'est pas parfaitement pointée. Dans le cas de la station fixe de Grasse, on utilise différents diaphragmes selon les conditions d'observations : le diaphragme a un champ de $40''$ de jour et de $100''$ de nuit, tandis que le champ de vue de la photodiode est de $40''$.¹

La seconde installation permettant de réduire le bruit parvenant jusqu'au photodétecteur de retour correspond à un **filtrage spectral**, rendu possible grâce aux propriétés de quasi-monochromaticité des photons émis par le laser.

On utilise un filtre à bande étroite éliminant tous les photons dont la longueur d'onde ne correspond pas à celle du laser. Ce filtre permet donc de limiter le bruit du fond du ciel, ce qui est indispensable, notamment pour les observations de jour. Dans le cas des stations laser satellites fixe et FTLRS, cette limitation est réalisée par l'utilisation d'un filtre interférentiel à faible largeur de bande (environ 1 \AA soit la largeur de bande du laser). Le filtre interférentiel doit être thermostaté afin de ne pas dériver en longueur d'onde sachant que sa fréquence centrale dépend de la température. Dans le cas du laser Lune, il s'agit d'un peigne de Fabry-Perot.

Enfin, la réduction du bruit résiduel se fait par **filtrage temporel**.

Ce filtrage correspond à une sensibilisation des détecteurs de retour uniquement très peu de temps avant (de 100 à 400 ns) l'instant de retour des photons prévu par les éphémérides, soit à une distance d'environ $\pm 100 \text{ m}$; d'où la nécessité de disposer de bonnes prévisions d'orbites. Ce filtrage peut être obtenu soit en plaçant une porte électronique sur le signal de retour, soit en activant le récepteur à un instant calculé. Pour les passages de satellites avec une bonne précision d'orbite comme LAGEOS, la porte temporelle peut être étroite (largeur de 100 ns). Mais pour des satellites à basse altitude, sujets à des manœuvres fréquentes et à une influence de l'activité solaire, la largeur de porte doit parfois être augmentée de quelques microsecondes afin de compenser une plus pauvre prédiction de trajectoire. D'un autre côté, le plus haut niveau du signal de retour associé à des satellites bas permet une

¹ La partie sensible de la photodiode utilisée de jour ou de nuit est différente puisqu'on n'observe pas avec le même diaphragme.

augmentation du seuil de prise en compte de la détection. Le filtrage temporel peut souvent être échangé contre le filtrage en amplitude lors d'observations diurnes de satellites bas. Pour se placer dans le cas du simple photon, on place généralement des densités optiques sur le chemin de détection.

La probabilité de détection suit la loi de Poisson et le nombre de photons détectés vaut :

$n = n_{signal} + n_{bruit}$. Pour un détecteur d'efficacité quantique q_e ($0 < q_e < 1$), le taux de retour est $100 \cdot \left(1 - (1 - q_e)^n\right)$ où n représente le nombre de photons touchant le photodétecteur [Appleby et Gibbs, 1994]. Le Tableau 2.2 donne des ordres de grandeur de la probabilité de détection en fonction du nombre de photons incidents pour un rendement quantique de 0,2.

Tableau 2.2 : Probabilité de détection en fonction du nombre de photons incidents pour un photodétecteur dont la réponse suit la loi de Poisson. Le rendement quantique utilisé est de 0,2.

Nombre de photons	Probabilité de détection
1	0,20
5	0,67
10	0,89
25	0,99
50	1,00

Les stations emploient comme détecteur de retour une photodiode à avalanche ou un photomultiplicateur. Le premier type de détecteur est plus généralement utilisé en Europe tandis que le deuxième est plus couramment utilisé par les stations américaines. Le Tableau 2.3 établit un comparatif entre ces deux catégories de photodétecteurs. Dans la suite, seul le cas des photodiodes sera abordé puisque c'est le type de détecteur utilisé par les trois stations de télémétrie laser du plateau de Calern depuis quelques années.

Un autre facteur influençant la précision des mesures est la réponse du détecteur en fonction du nombre de photons revenant du satellite. En effet, quand on sort du régime de simple photon, il apparaît un biais en distance en fonction du nombre de photons arrivant sur la photodiode. Pour contrer ce phénomène dans le cas des photodiodes à avalanche, on utilise une C-SPAD (*Compensated Single Photon Avalanche Diode*) qui comprend une électronique compensatrice [Prochazka et al., 1996], [Kirchner et Koidl, 1996], [Kirchner et al., 1997]. La qualité des mesures dépend aussi de l'endroit de la surface sensible du photodétecteur sur lequel arrive le photon (effet centre-bord). Ces deux facteurs peuvent induire des biais, mais sont en grande partie compensés dans le cas d'une C-SPAD.

Tableau 2.3 : Comparatif des caractéristiques d'une photodiode à avalanche et d'un photomultiplicateur. PM indique les photomultiplicateurs classiques qui ne sont plus utilisés en télémétrie laser en raison de leurs performances médiocres. MCP indique les photomultiplicateurs à galettes de microcanaux, bien plus coûteux, mais présentant des performances très intéressantes.

Type de détecteur	Photodiode à avalanche	Photomultiplicateur
Diamètre	100-200 μm	Quelques cm
Bruit interne	Fort (nécessité de refroidissement) Sensibilisation dans un état très instable et l'avalanche peut se déclencher en l'absence de photon	Très faible Déclenchement uniquement en présence de photons
Rendement quantique	$\sim 15\text{-}20\%$	$< 10\%$
Temps de réaction	$\sim 1\text{-}5$ ns	$\sim 20\text{-}30$ ns pour les PM classiques ~ 1 ns pour les MCP
Variation du temps de transit	20-30 ps	100-200 ps (PM) 20-30 ps (MCP)
Effet centre-bord	Compensable électroniquement (C-SPAD)	Négligeable (uniquement pour les MCP)
Linéarité de la réponse impulsionnelle	Dépendance du temps de transit en fonction du nombre de photons incidents (de quelques photons à quelques centaines) mais compensable électroniquement (C-SPAD)	Réponse linéaire de quelques photons à quelques centaines
Fragilité	En principe robuste et inusable	Trop de lumière peut être fatal Efficacité de MCP diminuant avec le nombre de détections déjà réalisées (charges écoulées)

Une photodiode à avalanche est un photodétecteur à semi-conducteur améliorant à la fois la sensibilité, la précision et la stabilité, par rapport à l'utilisation de photomultiplicateurs (PM). Ses avantages peuvent être résumés comme suit. Tout d'abord, elle présente une grande sensibilité à détecter des signaux lumineux de très faible intensité, notamment vers le rouge, longueur d'onde pour laquelle les PM n'ont qu'une très faible sensibilité. Une photodiode n'a pas besoin d'une tension de polarisation aussi élevée que les PM (simplification de l'électronique de commande). Elle ne peut pas être détruite par une trop forte exposition à la lumière, d'où une durée de vie plus longue sans perte de sensibilité avec le temps. Enfin, son coût est moins élevé.

Cependant, ce type de photodétecteur a également des inconvénients. L'emploi de photodiodes implique de devoir faire face à quelques difficultés.

Premièrement, la partie sensible est de très petite taille d'où des difficultés d'alignement optique, leur champ de vue étant très limité. Cela nécessite aussi de disposer d'une chaîne optique de détection ayant une excellente qualité.

Deuxièmement, leur bruit interne est beaucoup plus élevé, même en refroidissant fortement le détecteur. Ce dernier offre une sensibilité au premier photon arrivant sur le détecteur, qu'il provienne effectivement du satellite ou simplement du bruit. Ainsi, on peut détecter des réflexions parasites à la place des photons attendus à cause d'un excès dans la puissance du signal. Les photodiodes sont en effet très sensibles au bruit et ont tendance à partir seules en avalanche même en l'absence de photons. Dans ce dernier cas, il faut attendre avant que la photodiode soit de nouveau sensible et on perd alors le photon qui pourrait revenir pendant ce temps. Un des problèmes majeurs liés à l'utilisation d'une photodiode à avalanche est donc celui du bruit interne et on doit la refroidir afin d'éviter ce genre de

problème. Il ne faut cependant pas trop la refroidir car l'efficacité quantique diminuerait. La température idéale se situe vers -40-60 °C.

Troisièmement, le niveau du signal de sortie est presque indépendant de la quantité de lumière reçue, à savoir qu'un seul photon donne le même signal de sortie que plusieurs photons. Il est donc difficile d'estimer l'énergie du signal de retour.

Enfin, une photodiode à avalanche produit un effet de « queue de distribution » lorsque l'on trace l'histogramme des résidus (différence entre la distance mesurée et la distance calculée), asymétrie qui traduit un artefact instrumental et se mélange à la signature du satellite.

L'utilisation de photomultiplicateurs pose également quelques problèmes, puisque par exemple le temps de transit à l'intérieur du détecteur n'est pas constant (~200 ps d'incertitude soit ~3 cm en distance). Il existe des PM à galette à microcanaux (MCP) qui sont très coûteux mais dont la réponse impulsionnelle est linéaire par rapport au signal lumineux reçu. Ce sont les seuls utilisés aujourd'hui en télémétrie laser. De plus, des difficultés sont rencontrées lors de l'utilisation de ces derniers, notamment pour la modélisation de la réponse impulsionnelle d'un tel photodétecteur.

Les photodiodes à avalanche présentent une bonne stabilité du temps de transit (10-20 ps) et une efficacité quantique relativement bonne, mais leur signal ne varie pas linéairement avec la rapidité mais dans le sens inverse. Pour avoir une bonne efficacité quantique, on perd un peu en vitesse de transit, tandis que c'est justement la rapidité qui est à privilégier en télémétrie laser. Selon le nombre de photons qui arrivent, le temps de transit varie et il peut y avoir une dérive de 250 ps pour 1 000 photons. En pratique, on ne sait pas trop combien de photons arrivent simultanément tandis que le temps de montée du signal électrique de sortie de la photodiode dépend du nombre de photons (le temps de transit étant d'autant plus court que le nombre de photons augmente), d'où l'intérêt d'utiliser des photodiodes compensées.

Le temps de réponse d'une photodiode est d'environ 1,5 ns, avec un écart-type inférieur à 10 ps (dans le cas d'utilisation de densités optiques). Les variations du temps de transit dans la photodiode s'élèvent à environ 500 ps (soit environ 7 cm en aller simple) d'écart dans le temps de réponse du détecteur entre 1 et 1 000 photo-électrons pour une photodiode non compensée. Cela pourrait expliquer les sauts observés dans la qualité des mesures de la FTLRS effectuées au cours de la campagne en Corse. La valeur de variation de temps de transit est réduite à moins de 10 ps (soit 1,5 mm en aller simple) dans le cas d'une C-SPAD [Schreiber et Haufe, 1998]. La Figure 2.21 ci-dessous résume les différences de réponse entre une C-SPAD et une photodiode à avalanche classique.

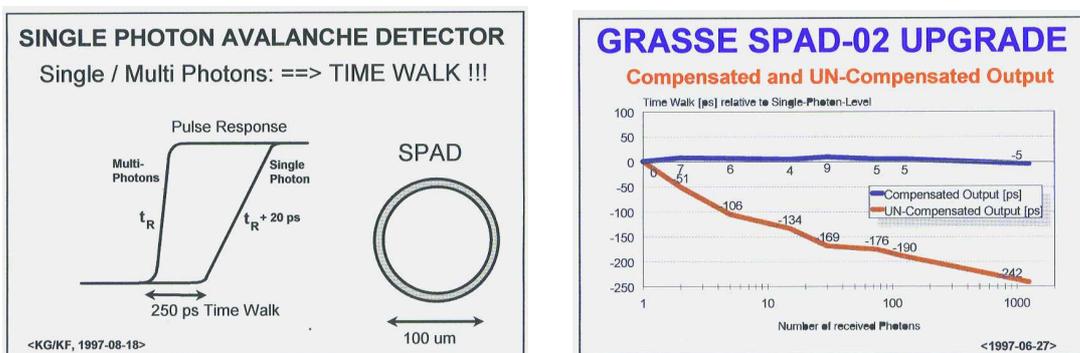


Figure 2.21 : Résumé des particularités d'une C-SPAD par rapport à une photodiode à avalanche classique (d'après [Kirchner et al., 1997]).

Le niveau de précision recherché actuellement est tel qu'il faut utiliser les photodiodes avec beaucoup de précautions et qu'il est recommandé d'utiliser un système de compensation du temps de réaction en fonction du nombre de photons arrivant sur le détecteur. Le problème de l'étalonnage, déjà évoqué dans la troisième partie de ce chapitre, est un autre facteur important dans cette quête de performances ultimes. A ce niveau, quelques recommandations peuvent être évoquées. Celles-ci concernent l'utilisation de cibles d'étalonnage optiquement correctes, la nécessité de disposer d'un filtrage spatial efficace (faible champ de vue), de s'assurer de la perfection des alignements, d'utiliser des cibles multiples (avec des azimuts et des distances différentes), ainsi que de collecter suffisamment de données.

Dans le contexte des performances instrumentales, les stations sont en amélioration constante. Il est important de noter que chaque instrument laser travaille avec son propre détecteur ; même si tous sont du même type, ils peuvent présenter des qualités non équivalentes. Dans le réseau international, environ 17 stations laser utilisent une photodiode comme détecteur principal.

Par exemple, la station laser satellites fixe de l'OCA et la FTLRS sont équipées d'une C-SPAD tandis que la station laser Lune utilise une SPAD (*Single Photon Avalanche Photodiode*). En pratique, la station laser Lune travaille toujours avec un niveau de détection du simple photo-électron, à la fois pour les observations des satellites ou de la Lune. Concernant la station laser satellites fixe, une C-SPAD a été installée à la fin de l'année 1997, solution plus commode pour les satellites ayant des altitudes inférieures à quelques milliers de kilomètres et qui ont donc un meilleur bilan de liaison. Dans le cas de la FTLRS, le détecteur de retour utilisé au cours de la campagne Corse était une photodiode à infrarouge qui nécessitait, de la part de l'observateur, un ajustement précautionneux et continu du niveau du signal de retour. Mais cette opération n'était pas confortable et parfois délicate. Dorénavant, l'émission laser se fait dans le vert et la détection avec une C-SPAD. La qualité des mesures de la station laser satellites fixe du plateau de Calern ayant considérablement augmenté suite au remplacement du photomultiplicateur par une C-SPAD, cette modification de la FTLRS est donc très prometteuse dans la recherche d'une exactitude centimétrique.

Les points importants pour caractériser la qualité d'un détecteur sont la précision et la stabilité du temps de transit en fonction de différents paramètres et le rendement quantique.

La détection en mode simple photon¹ est censée éliminer toute instabilité due au niveau du signal de retour. Cependant, la détection en mode multi-photons est employé dans de nombreuses stations, principalement dans celles utilisant des photodétecteurs de type photomultiplicateur.

Il est important de pouvoir caractériser les différentes propriétés de chaque détecteur, à savoir le type de détecteur utilisé, l'installation électronique et de pouvoir identifier les problèmes comme par exemple la dégradation de la réponse d'un photodétecteur avec la largeur de la porte temporelle utilisée. Dorénavant, il est essentiel de communiquer de telles informations essentielles dans la recherche de performances toujours accrues des systèmes laser. Les procédures pour discriminer les échos réels du bruit et la liste des problèmes et avantages de chacune d'elles sont aussi à analyser. Il serait également intéressant de connaître le bénéfice d'avoir un dispositif permettant de mesurer le niveau du signal de retour ; actuellement on n'y a accès que dans bien peu de stations laser. La modification apportée à la FTLRS à se propos sera indiquée plus loin.

En conclusion, il est vraiment important de souligner que dans ce processus, le détecteur laser est toujours une source d'erreurs ou de biais. En effet, l'instant de la détection du signal varie en fonction du nombre de photons reçus, de la localisation des impacts des photons sur la zone sensible de la photodiode (effet centre-bord), de la tension appliquée à la photodiode ainsi que du délai entre la présensibilisation du détecteur et l'arrivée effective des photons.

¹ Le signal de retour est forcément affaibli pour atteindre un niveau aussi faible que celui du simple photon.

4.3.b Améliorations apportées aux systèmes de détection de la FTLRS

INSTALLATION D'UNE C-SPAD COMME DETECTEUR DE RETOUR

Le changement de la longueur d'onde d'émission du laser a imposé l'installation d'un autre détecteur de retour, avec une sensibilité élevée, adaptée à la longueur d'onde verte et avec une vitesse de réaction rapide.

Dans un premier temps, une photodiode à avalanche classique fonctionnant en mode Geiger (SSO-AD-230) similaire à celle utilisée par la station laser Lune a été installée. Sa température était stabilisée à -20°C avec un système de refroidissement par effet Peltier (élaboré par E. Samain, OCA). Après avoir polarisé la photodiode, mesuré la tension Geiger nécessaire pour la sensibiliser, puis vérifié la qualité et la stabilité du système de régulation thermique, quelques tests ont été réalisés. Les biais liés : (1) à la tension Geiger appliquée à la photodiode, (2) au nombre de photons arrivant sur la surface sensible et (3) à l'instant d'arrivée de ces photons sur le détecteur ont été évalués. Les performances du détecteur déduites de ces tests sont apparues meilleures que celles obtenues dans la configuration antérieure (en infrarouge), sans toutefois atteindre le niveau de la station laser fixe. Les principales limitations proviennent de la dépendance vis-à-vis du niveau du signal de retour. Des acquisitions normales de mesures de distances sur tous les satellites bas ont été réalisées, mais aucune acquisition n'a pu être réalisée sur les satellites LAGEOS, en raison d'une météorologie peu favorable à cette époque.

Le comportement de la photodiode non compensée a été étudié en fonction de la tension appliquée, du délai de présensibilisation et de la puissance du laser en réalisant des étalonnages internes. Ces mesures ont confirmé le fait qu'une photodiode réagit différemment selon le niveau d'énergie de lumière qui arrive (variations du temps de montée du signal sortant) d'où la nécessité d'utiliser une photodiode compensée électroniquement de cet effet : une C-SPAD. C'est justement ce type de détecteur qui est actuellement installé.

Il est également apparu qu'il ne fallait pas sensibiliser la photodiode ni trop tôt ni trop tard par rapport à l'arrivée des photons. En effet, la tension appliquée n'étant pas un créneau parfait, elle varie légèrement au cours du temps (petites instabilités au début puis faible décroissance). Le bon intervalle de temps de présensibilisation pour la photodiode étudiée se situe entre 70 et 170 ns. Ces mesures du comportement de la photodiode ont donc montré des variations de la distance mesurée en fonction des trois paramètres étudiés pouvant atteindre 1-2 cm dans le pire des cas.

Compte tenu de ces résultats, il a alors été décidé de changer à nouveau de détecteur de retour et d'installer le même que celui utilisé par la station laser satellites fixe du plateau de Calern et quelques-unes des meilleures stations du réseau international comme Graz (Autriche) et Herstmonceux (GB). Il s'agit d'une photodiode à avalanche sensible au simple photo-électron développée par l'université de technologie de Prague [Prochazka et al., 1996]. Ce détecteur comprend également un système de correction des dérives du temps de transit en fonction du nombre de photons reçus par l'utilisation d'un dispositif électronique fourni par l'université de Graz [Kirchner et Koidl, 1996].

L'utilisation d'un tel détecteur se révèle très importante pour atteindre l'exactitude de 1 cm puisqu'il présente un haut niveau de performance et une plus grande sensibilité. L'installation d'un tel détecteur en octobre 1997 à la station laser satellites fixe de Grasse a été une avancée considérable en terme d'exactitude des mesures de distance et de stabilité des biais [Nicolas et al., 1999].

Ce système de détection, acheté en juin 1999 au groupe Austro/Tchèque, représente ce qui existe de mieux actuellement au monde pour ce type de détection à avalanche. Cet investissement va très largement contribuer à améliorer la précision de la station et surtout sa stabilité dans le temps. L'électronique de compensation permet de s'affranchir en très grande partie des inexactitudes et des biais induits par des variations du niveau du signal lumineux de retour et se révèle donc indispensable

pour la télémétrie des satellites ayant des orbites basses. Ce dispositif permet en outre d'éviter une sensibilité aux effets « centre-bord » du détecteur, qui se traduisent, sans cette correction, par une variation du temps de transit dans le photodétecteur selon le point d'impact des photons sur la surface sensible (propagation de l'avalanche plus ou moins rapide).

Cet ensemble a été spécialement adapté et amélioré en collaboration avec l'équipe de l'OCA pour prendre en compte les très petites dimensions de la tourelle de la station laser mobile ainsi que les conditions de températures très fluctuantes dans cet environnement (instrument de terrain). L'électronique associée au système de compensation a donc été miniaturisée et une régulation thermique à -60 °C de la partie sensible du détecteur a été ajoutée. Le diamètre de la surface sensible de ce détecteur, d'environ $200 \mu\text{m}$, est beaucoup plus petit que celui de celle utilisée en Corse¹, ce qui impose davantage de contraintes sur les alignements optiques.

La mise en place de cette photodiode a nécessité l'introduction d'une nouvelle optique de focalisation et de petites modifications mécaniques de l'arrière du télescope. L'utilisation d'un tel photodétecteur avec un tel degré élevé de sensibilité nécessite une attention particulière. Dans un premier temps, étant donné que le système de compensation est conçu et optimisé pour fonctionner avec des impulsions de 35 ps de largeur, la largeur des impulsions laser a été réduite de 100 ps à 35 ps afin d'obtenir une meilleure efficacité et exactitude dans la détection de retour, comme cela a déjà été mentionné. Son installation (optique, électronique ...) et les alignements optiques, bien que très délicats par la compacité de l'ensemble, ont été réalisés de façon satisfaisante.

Des tests de performances de chronométrie ont été menés en réalisant des mesures d'étalonnage sur un rétro réflecteur installé à la sortie du télescope avec une puissance de laser réduite à 1 mJ. L'écart-type des mesures était d'environ 70 ps (1 cm) avec une largeur d'impulsion laser de 100 ps et la stabilité était meilleure que 20 ps (3 mm) après 30 minutes de fonctionnement. De plus, aucune dépendance en fonction de l'azimut n'a pu être mise en évidence.

Puis, au cours de tests réalisés avec une puissance de laser élevée, un problème d'augmentation considérable du bruit interne de la diode a immédiatement été mis en évidence dès lors que l'énergie du laser atteignait une valeur nominale de poursuite de satellites. Ce bruit est dû à l'important flux de lumière parasite au moment du tir laser, lumière rediffusée en partie vers le photodétecteur de retour. Le nombre de photons parasites estimés sur le détecteur est de quelques dizaines de millions, ce qui n'est heureusement pas suffisant pour détruire la surface sensible. Cela peut néanmoins fortement perturber le fonctionnement de la photodiode pendant plusieurs secondes après le tir laser. De plus, le temps d'aller-retour des impulsions lumineuses variant de 4 à 100 ms, il est impossible d'avoir un mode de fonctionnement normal dans ces conditions. Il est à noter que la configuration complètement différente de la station laser satellites fixe (voies d'émission et de réception séparées) n'avait pas mis en évidence ce type de dysfonctionnement.

Par conséquent, un long et délicat travail d'investigation a été mené afin d'évaluer l'origine et la quantité lumineuse dirigée vers la diode à l'émission, ces investigations étant rendues difficiles par la compacité extrême de la tourelle alliée à une grande proximité des canaux d'émission laser et de réception où l'on cherche à détecter seulement quelques photons.

MISE EN PLACE D'UN OBTURATEUR ELECTRO-OPTIQUE

Nos recherches sur les limitations de l'éblouissement de la photodiode de retour au moment du passage de l'impulsion laser de départ dans la tourelle nous ont conduits à utiliser un obturateur opto-électronique à cristaux liquides (voir Figure 2.22) placé juste devant le filtre interférentiel à environ 15 cm du détecteur de retour.

¹ Mais il est identique à celui de la diode SSO-AD-230, i.e. celle utilisée entre les deux photodétecteurs de retour.

Il s'agit d'un dispositif de 4-5 cm de diamètre constitué de deux lames de verre entre lesquelles se trouvent des cristaux liquides ou LCD (*Liquid Crystal Display*). Le fonctionnement de ces derniers est tel que lorsqu'une certaine tension est appliquée, la structure moléculaire des cristaux liquides se déforme et les cristaux s'alignent selon une direction dépendant de cette structure moléculaire et de la tension appliquée.

Ce système n'induit pas de changement de polarisation de la lumière¹. Son état par défaut est ouvert, sa fermeture se fait en moins de 1 ms et son ouverture en moins de 2 ms, sans hystérésis. Un tel dispositif offre les avantages de faible encombrement, de légèreté, de très faible consommation d'énergie et de ne présenter aucune partie mobile. Sa transmission optique est élevée dans le domaine visible et le proche infrarouge (> 80%). Cependant, le passage de la lumière à travers l'obturateur va détériorer un peu le rapport signal/bruit au niveau de la caméra CCD. Les distorsions optiques du front d'onde sont inférieures à $0,5\lambda$, ce qui ne va pas trop détériorer le faisceau laser qui de toute façon n'est pas parfait.

Les températures de fonctionnement de l'obturateur sont comprises entre 0 et 60°C, la limite basse étant extensible jusqu'à -20°C. Dans le cas d'une utilisation telle que pour la station mobile, nous avons jugé utile de le réguler en température. Un module de chauffage miniaturisé a donc été élaboré avec des résistances chauffantes telles que la température minimale soit de 14°C². Le principal problème concernant ce point était d'installer des capteurs de température au voisinage de l'obturateur. L'obturateur a besoin d'une tension d'alimentation de 200 V.

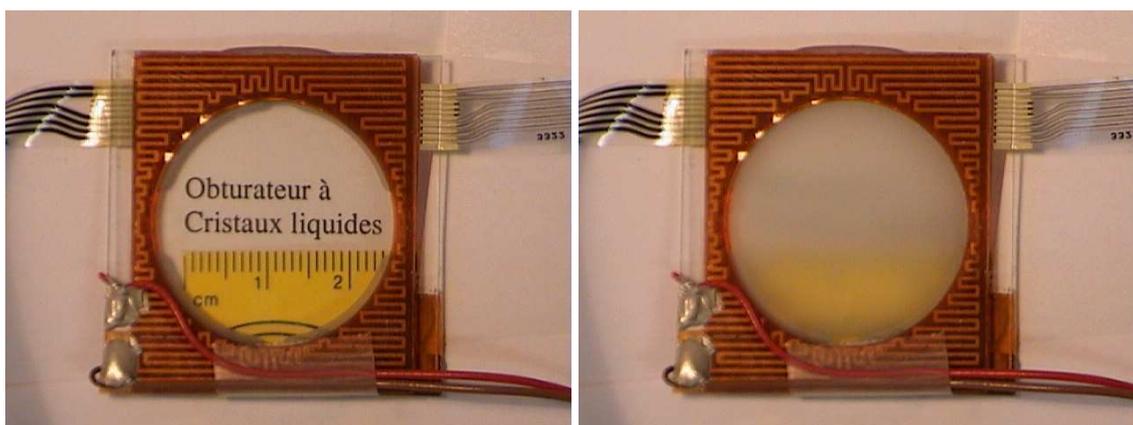


Figure 2.22 : Obturateur électro-optique installé dans la tourelle de la Station Laser Ultra Mobile. L'obturateur est en position ouverte à gauche et fermée à droite.

Afin que l'obturateur soit fermé au moment des tirs laser et puisqu'il est naturellement ouvert, sa fermeture est commandée par un système de synchronisation par rapport aux tirs laser. Il est donc excité à 10 Hz, fréquence des impulsions laser.

¹ Ce qui est essentiel dans le cas d'une station laser comme la FTLRS qui sépare les voies d'émission et de réception par un jeu de polarisation de la lumière.

² Le système de régulation thermique n'est pas utile en été ($T > 10^\circ\text{C}$), même la nuit.

Lorsque l'obturateur est fermé, il devient diffusant, semblable à du papier calque. Afin que le faisceau soit suffisamment atténué, il est nécessaire de placer ce dispositif assez loin du détecteur par rapport à la source de lumière.

Pour l'installation de cet obturateur, il a fallu tenir compte des problèmes d'intégration d'un objet dans un espace réduit. Ainsi, la mise en place d'un tel dispositif a nécessité le développement d'une électronique miniaturisée associée à la commande de fermeture, à la régulation thermique et à la synchronisation par rapport aux impulsions laser. Une partie de la tourelle a également dû être modifiée en mettant un capot sous le télescope dans lequel se trouve toute l'électronique nécessaire au fonctionnement de l'obturateur et un fil acheminant le signal de l'électronique de commande située dans un container jusqu'à l'obturateur a dû être installé.

L'obturateur ne peut chauffer par l'éclairage et a priori ce dispositif n'est pas fragile, mais un deuxième a été prévu en réserve.

En installant provisoirement ce dispositif, devant le filtre interférentiel situé à environ 15 cm du détecteur, les mesures effectuées ont montré que la diffusion introduite par les cristaux liquides était suffisante pour protéger la diode au moment du tir laser.

Des tests de chronométrie du temps d'obturation sont à prévoir, comme par exemple essayer de voir s'il existe une influence chronométrique i.e. une sensibilité par rapport au délai.

AMELIORATION DU SYSTEME DE DETECTION DE DEPART DES IMPULSIONS LASER

Le système de détection de départ des impulsions laser constitue un autre point essentiel dans l'exactitude globale des mesures. Initialement, la détection du départ de l'impulsion laser se faisait avec une photodiode travaillant en mode saturé. Dans cette configuration, le signal provenant de ce détecteur n'était pas proportionnel au nombre de photons incidents. Le régime saturé est commode d'utilisation mais il présente l'inconvénient d'être sensible aux variations de la largeur des impulsions lumineuses, ce qui est problématique en termes de chronométrie et beaucoup plus que le mode linéaire de détection. De plus, la non linéarité induit une augmentation artificielle des impulsions parasites proportionnellement au reste du signal, ce qui peut avoir une influence très importante sur la chronométrie en induisant des biais non négligeables dans la métrologie¹. D'autre part, comme le mode de fonctionnement n'est pas identique entre les observations de satellites (amplificateur double passage) et les mesures d'étalonnage (uniquement la cavité laser), les erreurs induites par ce type de détection de départ non linéaire ne sont pas les mêmes dans ces deux configurations et la qualité de la métrologie est donc différente. La sensibilité du détecteur par rapport à tout ce qui se passe avant et après, la présence d'impulsions parasites beaucoup plus nombreuses quand l'amplificateur double passage est en marche sont aussi à prendre en considération.

Des modifications ont été apportées à ce sujet afin d'améliorer le rapport signal/bruit et minimiser les impulsions parasites par rapport à celles à dater. Avec la configuration saturée, les parasites étaient environ deux fois plus intenses que les impulsions intéressantes mais, et heureusement, ils arrivaient après l'impulsion à dater. Optiquement, ces modifications font gagner un facteur deux. Au niveau électronique, on ne fonctionne plus en mode saturé afin de gagner en sensibilité par rapport à la largeur des impulsions laser.

¹ Tous ces problèmes d'impulsions parasites sont notamment liés au fait que le chemin optique sur le banc laser est replié et que, par conséquent, tout est très confiné.

Jusqu'à présent, aucune information quantitative de l'énergie n'était disponible. Un dispositif d'échantillonnage numérique du niveau du signal a donc été élaboré puis installé¹. Ainsi, des instabilités du laser n'influeraient plus sur la détection du départ. La possibilité de mesurer parallèlement le niveau du signal laser de départ a donc été ajoutée. Ainsi, l'observateur disposera en temps réel de données numériques sur le niveau du laser et par conséquent sur son état. On peut envisager d'établir une table de correction de dérive de chronométrie en fonction du niveau du laser. La mise en place de ce nouveau système de détection n'est plus à un niveau constant comme auparavant et permet d'avoir le barycentre de l'impulsion au niveau du détecteur de départ. Par conséquent, une amélioration du bilan global d'erreur est obtenue.

Initialement, le système de détection de départ détectait certes l'impulsion laser mais surtout des parasites : la détection se faisait avec un seuil, d'où une importante sensibilité à la largeur des impulsions et donc une variation de chronométrie (facteur 10)². Désormais, la détection du départ des impulsions laser se fait à partir du barycentre du signal donné par un photodétecteur rapide grâce à la réalisation d'une carte en 6 couches comprenant le détecteur de départ et l'électronique associée envoyant le signal vers la chaîne de chronométrie. Le choix s'est porté vers une détermination du barycentre plutôt que vers une détection à un niveau constant car dans ce dernier cas, des variations de niveau d'énergie du laser induisent également des variations de largeur d'impulsion et donc de la datation. Le barycentre, lui, ne dépend pas de la largeur des impulsions laser.

A ce niveau, il est important de rappeler que tous ces problèmes métrologiques liés au détecteur de départ n'existaient pas durant la campagne en Corse. Ils sont en effet liés à l'insertion d'une optique convergente devant la photodiode de départ qui a été mise en place pour l'expérience de faisabilité de T2L2 au sol entre la FTLRS et la station laser Lune en juin 1998. Cette optique permet de faire converger la lumière dans la fibre optique remplaçant momentanément la diode de départ et elle a été laissée installée sur le banc laser depuis. Néanmoins, pendant la campagne en Corse, les problèmes de variations de niveau du laser et de largeur des impulsions peuvent expliquer les instabilités des mesures observées sur quelques passages dans l'analyse des données.

Avec un tel système de détection de départ, la dérive résiduelle en fonction du niveau du laser est de quelques picosecondes, aucun élément n'est thermiquement sensible et tous les éléments sont linéaires. La bande passante du détecteur est courte (3 GHz) et comme les dérives sont proportionnelles au temps, elles sont complètement négligeables (<1 s en écart-type). La stabilité temporelle de ce nouveau système de détection a été testée avec une diode laser émettant des impulsions de 30 ps de large dans le rouge et estimée inférieure ou égale à 130 fs. L'écart-type entre le signal synchrone et les impulsions laser est de 6 ps, dont 5 ps sont liées à la chronométrie. Les tests de performances de ce nouveau système de détection de départ sont à refaire avec le laser de la FTLRS. Cependant, compte tenu des résultats des premiers tests, on peut conclure que la FTLRS dispose désormais d'une excellente détection de départ.

REMARQUES SUR L'UTILISATION D'UN DETECTEUR UNIQUE

L'utilisation d'un seul détecteur pour les signaux de départ et de retour serait idéale pour limiter les sources d'incertitudes liées à la détection et pour s'affranchir des systématismes du détecteur utilisé. Cependant, de nombreuses difficultés doivent être surmontées d'un point de vue pratique. Ce ne sont pas seulement les niveaux d'énergie non similaires pour le départ et l'arrivée qui sont en cause, mais aussi un comportement différent d'une telle photodiode à avalanche entre l'étalonnage et les

¹ Une carte électronique très rapide (intégration constante à 3 GHz) a été réalisée par E. Samain.

² Par exemple, une variation de la largeur d'impulsion laser de 10 ps induisait une variation de 100 ps dans la chronométrie, soit 1,5 cm !

observations de satellites. En effet, pendant l'étalonnage, l'impulsion de retour suit l'impulsion de départ dans un intervalle de quelques 100 ns ou quelques microsecondes ; l'état de la photodiode à avalanche et de son électronique pour la détection de l'impulsion de retour seront différents en comparaison à ceux des retours de satellites. Cela peut rendre très difficile de détecter des biais artificiels et de les éviter. De plus, la contribution à l'écart-type global sera significativement plus importante que celle d'un détecteur conventionnel d'impulsion de départ ayant un très grand nombre de photons. Enfin, compte tenu du système de détection de départ très performant dont est désormais dotée la FTLRS, l'avantage d'un tel détecteur unique devient caduque.

SUPPRESSION DE LA TRANSMISSION DU SIGNAL DE RETOUR PAR LES CONTACTS TOURNANTS DE LA TOURELLE

Dans la configuration d'origine de la FTLRS, tous les signaux électriques, y compris ceux des détections de retour, étaient transmis par des contacts tournants placés dans la tourelle. Cette situation était confortable pour l'utilisation puisqu'aucun câble n'était situé à l'arrière du télescope. Ainsi, l'observateur pouvait effectuer toutes les manœuvres nécessaires à la poursuite de satellites successifs sans jamais avoir à se soucier de la position de la tourelle avant le passage. Dans le cas contraire, il faudrait s'en soucier afin d'éviter tout problème de nœud, voire même d'arrachement du câble relié au télescope.

Mais malheureusement, cette configuration dégradait la bande passante du signal de télémétrie et induisait des instabilités supplémentaires dans la qualité des données. En effet, des mesures de délai de transmission d'un signal électrique à travers les contacts tournants de la tourelle ont été effectuées, et des variations relativement importantes selon l'orientation de la tourelle sont alors apparues.

Ces variations pouvaient atteindre environ 30 ps soit 5 mm sur la distance aller-retour (voir Figure 2.23). De plus, les délais dans ce genre de dispositif instrumental ne sont pas bien contrôlés et les tests électroniques ont révélé que le signal de sortie du boîtier de détection était largement dégradé par le passage dans les contacts tournants de la tourelle.

Les contacts tournants ne peuvent donc pas convenir à la transmission d'un signal comme celui de retour, dont la propreté est essentielle pour la qualité des mesures.

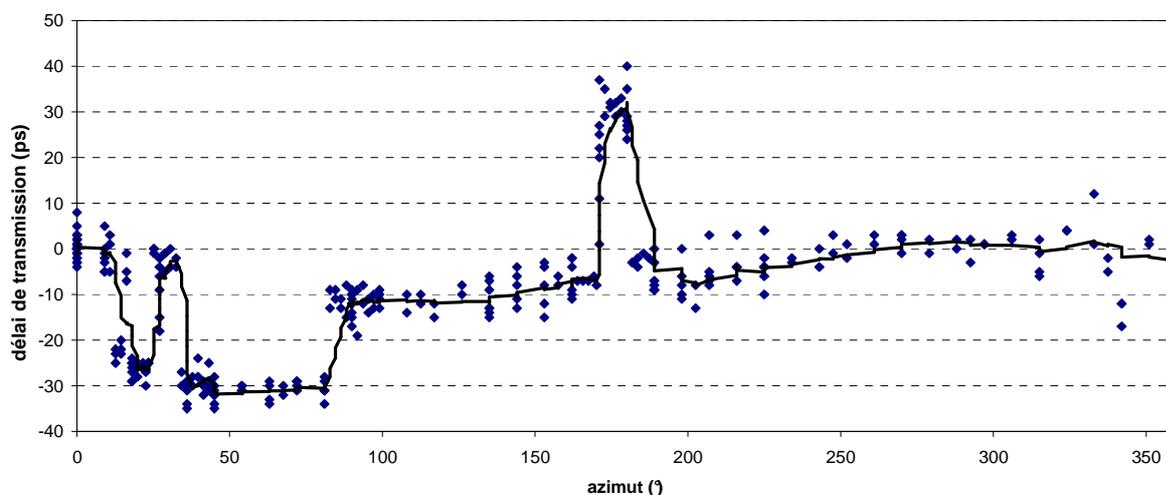


Figure 2.23 : Exemple de biais introduits par la transmission du signal de détection de retour par les contacts tournants de la tourelle.

En raison de cette erreur aléatoire (puisque non réellement reproductible) et dépendant de l'azimut, la solution retenue a été de faire circuler le signal dans un petit câble coaxial externe. Celui-ci est installé à la sortie de la photodiode de retour afin de transmettre directement le signal lié à la détection des échos laser au chronomètre, sans passer par les contacts tournants. Néanmoins, cette configuration impose alors une petite perte de mobilité du télescope dans le sens où, dorénavant, le télescope ne peut plus faire successivement de nombreux tours dans la même direction sans risquer d'emmêler le câble. Ceci a nécessité le développement d'un logiciel de gestion de la position de la tourelle qui se trouve ainsi limitée à $\pm \frac{3}{4}$ de tours.

Il faut noter ici que cette nécessité avait été préalablement envisagée pour éviter d'introduire des biais dépendants de la position de la tourelle. Cette solution, loin d'être idéale, bien gérée informatiquement, ne devrait pas gêner les observateurs, à condition que la tourelle garde un fonctionnement acceptable. D'autre part, cette situation est semblable à celle de la plupart des stations laser au monde, notamment la station laser fixe de Calern. Cette modification était réellement indispensable pour atteindre les performances recherchées avec la FTLRS.

PREPARATION DE L'EXPERIENCE T2L2

De manière à pouvoir participer aux expériences de Transfert de Temps par Lien Laser, une configuration alternative de fonctionnement de la FTLRS a été développée. Un deuxième instrument focal a ainsi été élaboré. Ce module contient une fibre optique, utilisée en lieu et place du photodétecteur de retour, et son optique de focalisation. La fibre optique permet de relier directement le foyer du télescope à un dateur optique. Ainsi, les propriétés du signal lumineux ne sont pas modifiées par la transformation des photons en signal électrique et la datation n'en est pas altérée, ce qui est indispensable pour les niveaux de précision recherchés (quelques ps). Là encore, la principale difficulté était de ne pas trop compromettre le bon fonctionnement de la tourelle et ainsi ne pas perdre trop de mobilité du télescope, nécessaire à la poursuite de la Station Spatiale Internationale (environ 400 km d'altitude). Quelques heures suffisent pour changer d'instrument focal et réaliser les réglages nécessaires.

Ainsi la FTLRS a désormais deux modes de fonctionnement selon l'instrument focal mis en place : un pour la télémétrie laser classique avec une photodiode à avalanche (mode simple photon) et un second pour le transfert de temps avec une fibre optique reliée à un dateur optique (mode multiphoton).

Fin juin 1998, une expérience de faisabilité de Transfert de Temps par Lien Laser a été menée durant quelques jours au plateau de Calern, entre la station laser Lune et la FTLRS, placée pour la circonstance sous la coupole du télescope de la station laser Lune (voir Figure 2.24). Les instruments nécessaires au transfert de temps (cible, prototype du module qui sera utilisé sur la Station Spatiale Internationale, horloge et dateur) ont été installés sur le sommet du plateau de Calern à 2 km des stations laser. Pendant cette campagne, les deux stations laser tiraient simultanément sur la cible et un transfert de temps a été réalisé entre les deux stations localisées au même endroit. L'analyse des mesures ainsi obtenues, réalisée par E. Samain et P. Fridelance, a montré une précision de l'ordre de 10 ps sur 2 jours. Un autre objectif de cette expérience était d'étudier la stabilité et la courbe d'incertitude du système (dispersion en fonction du temps d'intégration des observations) et de les comparer aux spécifications requises pour T2L2. Les résultats de cette campagne de test pour T2L2 sont très encourageants pour l'utilisation de la FTLRS pour les expériences de transfert de temps [Samain, 1999a].

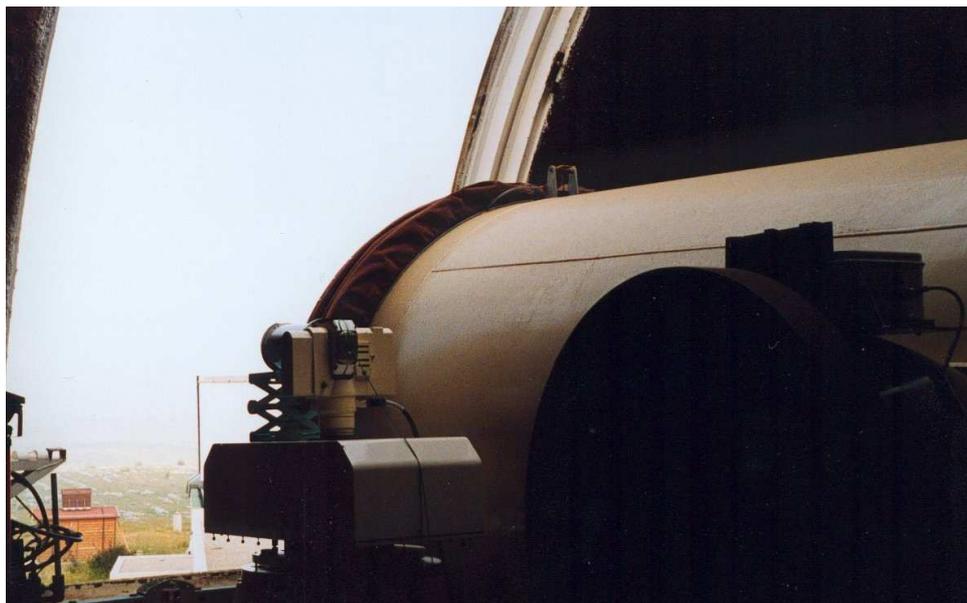


Figure 2.24 : La Station Laser Ultra Mobile et le télescope de la station laser Lune lors de l'expérience de faisabilité de transfert de temps en juin 1998.

CREATION D'UN FOYER SECONDAIRE DANS LE TELESCOPE

Afin d'éviter de fausses datations liées à la détection de photons arrivant à côté du détecteur ou diffusés dans le boîtier du photodétecteur¹, un foyer secondaire a été créé dans la tourelle pour réaliser un filtrage spatial. Ainsi, le champ de vue du détecteur est limité à 50'', tandis qu'initialement aucune restriction de ce type n'existait. Le bafflage du télescope limite certes le champ de vue en pleine lumière, ce qui constitue une sorte de diaphragme flou, mais reste insuffisant. La surface sensible utilisée sur la photodiode est donc désormais limitée suite à la création du foyer secondaire, ce qui permet de s'assurer que les photons arrivant dessus sont effectivement ceux provenant du satellite poursuivi.

Le dispositif mis en place devant le photodétecteur de retour se compose d'un doublet asphérique, d'un diaphragme fixe et de lentilles à gradient d'indice, éléments optiques réglables en position et focalisation. Un simple trou placé devant la C-SPAD aurait eu une moins bonne efficacité dans cette limitation de bruit.

Ainsi, les photons revenant dans le télescope traversent dans l'ordre : l'obturateur électro-optique, le filtre interférentiel, le système optique associé à la création de ce foyer secondaire et enfin des densités optiques avant d'arriver sur la surface sensible de la photodiode. L'aberration globale du système optique du foyer secondaire est d'environ 15 μm au niveau du photodétecteur.

Ce dispositif permettra d'avoir une plus grande souplesse sur le champ de vue des observations puisque sa mécanique a été conçue de telle sorte qu'on puisse changer facilement la taille du diaphragme (un champ de vue plus grand permet de compenser une mauvaise poursuite). D'ailleurs, lors de la campagne en Corse, l'observateur faisait un compromis entre la qualité de pointage et le nombre de photons détectés. Ainsi, le pointage sur le satellite pouvait être un peu moins bon afin que le détecteur reçoive plus de photons provenant du satellite et il existait de mauvaises détections. La

¹ Même lorsque le faisceau laser arrive à 500 μm du détecteur, on a encore des détections (voir étude présentée dans la 6^{ème} partie de ce chapitre). Ce problème est notamment lié au mode de fonctionnement multi-photons.

nécessité d'un tel mode d'observation était liée au décalage existant entre les axes optiques d'émission et de réception (réglages très difficiles et délicats) qui peut changer en fonction de l'orientation du télescope¹.

L'ensemble opto-mécanique nécessaire à la création de ce foyer secondaire a été conçu et réalisé afin d'assurer l'équilibrage de l'ensemble tourelle-télescope. Nous en avons également profité pour élaborer un banc de réglages fins de focalisation qui se positionne (à 10 μm près grâce à un système de piétement) en sortie du télescope à la place de la culasse de la tourelle et qui simulera la photodiode avec une caméra CCD. Un protocole de réglages sera établi. Ce système de réglages dispose d'un blocage afin qu'il ne puisse bouger au cours des transports.

ETUDE DE LA CONDUCTION THERMIQUE DE LA TOURELLE

Lors de l'installation de la nouvelle photodiode à avalanche après le retour de Corse de la FTLRS, une étude a été réalisée sur la conduction thermique de la culasse de la tourelle au niveau de l'emplacement du détecteur. Une résistance chauffante a ainsi été fixée sur la face interne de la culasse et les écarts de température entre la surface externe de la culasse et l'atmosphère ambiante ont été mesurés en fonction de la tension appliquée à la résistance, et donc de la puissance dissipée.

Les résultats sont tout à fait satisfaisants concernant l'utilisation du système de régularisation thermique de la photodiode. En effet, ce dernier dissipe au maximum 2 W tandis que l'étude a montré que, même à 3 W, la température de la culasse de la tourelle se stabilisait rapidement, l'écart de température entre la tourelle et l'air ambiant restant toujours inférieur à 5°C. La qualité et la stabilité thermique du système de refroidissement ont aussi été vérifiées avec succès.

4.4. La chaîne de chronométrie

4.4.a Spécifications requises pour atteindre une exactitude centimétrique

La télémétrie laser s'appuyant sur la mesure du temps de vol aller-retour d'une impulsion lumineuse entre la station et une cible, il est fondamental de disposer d'une chaîne de chronométrie suffisamment performante pour atteindre le niveau de précision recherché. En effet, compte tenu de la vitesse de propagation de la lumière, une précision en distance de 1 mm implique une précision sur la mesure du temps aller-retour meilleure que 10 ps.

Les éléments constituant le système chronométrique d'une station laser sont le dateur de départ, le chronomètre et une base de temps (horloge). Il existe plusieurs marques et modèles de dateurs d'événements et de chronomètres, qui selon les stations sont utilisés individuellement ou en groupes. La stabilité temporelle (en fréquence) des bases de temps de la chaîne de chronométrie sur de courtes durées et l'exactitude en fréquence sont des points essentiels dans la qualité des mesures laser.

La méthode de datation usuelle correspond à la transformation des photons en électrons puis à la datation des impulsions électriques. Quelle que soit la méthode employée, une mesure correspond toujours à un intervalle de temps ayant une origine fixe ou arbitraire. Les photodétecteurs transforment les impulsions lumineuses en impulsions électriques. Ces signaux sont ensuite acheminés vers les dateurs qui, excités par un signal issu de l'horloge, permettent de connaître les dates de départ et de retour pour chaque impulsion. Le temps de parcours de l'impulsion est alors calculé par différence entre ces dates.

¹ Les deux axes peuvent être décalés de 5°.

Les horloges au césium utilisées dans le réseau laser sont réputées pour leur extrême stabilité à long terme et ne présentent pas d'instabilités significatives sur les durées caractéristiques mises en jeu en télémétrie laser. Les performances en exactitude d'une horloge au césium, qui fournit le signal sinusoïdal à 10 MHz, sont de l'ordre de 10^{-12} . L'incertitude sur la mesure de l'intervalle de temps inférieur à 1 s est donc inférieure à 1 ps [Samain, 1999b].

4.4.b Amélioration apportée à la chaîne de chronométrie de la FTLRS

Lors d'une première étude de la chaîne de chronométrie, la qualité des chronomètres utilisés pour l'acquisition des données a été évaluée selon leur stabilité et par comparaison de différents chronomètres. On a ainsi comparé les instants de tirs laser et les durées de vol aller-retour obtenus simultanément par les deux chaînes d'acquisition de la station laser fixe et de la FTLRS. Un biais provenant d'un chronomètre a alors ainsi été détecté : il est apparu que l'un des chronomètres Stanford utilisés par la station laser satellites fixe induisait un biais puisque ses mesures sont stables à court terme (soit lors des étalonnages), mais pas à long terme (c'est-à-dire pour les observations des passages de satellites). Il a donc été remplacé. La comparaison de différents chronomètres a donc montré qu'ils n'étaient pas tous de même qualité, y compris au sein d'un même modèle d'une même marque.

Outre la modification du système de datation de départ, une autre modification importante de la chaîne de chronométrie de la Station Laser Ultra Mobile est en cours.

Initialement, cette chaîne se composait du détecteur de départ, d'un chronomètre Stanford et d'un oscillateur rubidium asservi sur GPS servant de source de temps et de fréquence. Suite à une panne de ce dernier, des études comparatives ont été menées au sein de l'OCA afin de choisir son remplaçant. Les qualités requises sont une exactitude en fréquence à 10 MHz et une excellente stabilité temporelle de la fréquence pour laquelle une spécification de 10^{-11} a été retenue. De plus, un récepteur GPS est indispensable dans le cas d'une telle station mobile pour obtenir la position de l'instrument en n'importe quel lieu de campagne d'observations et avoir une référence de temps par rapport à l'échelle internationale (TAI ou UTC). Enfin, ce système doit avoir des dimensions compatibles avec les containers de transport de la station, même si ce point logistique n'a aucun rapport direct avec les performances recherchées.

4.5. Système de poursuite

4.5.a Capacités nécessaires

Le collecteur de lumière d'une station de télémétrie laser est constitué d'un télescope et de sa monture. La particularité de cet ensemble est sa grande mobilité requise pour la poursuite des cibles proches¹. L'ensemble émetteur laser/télescope doit être motorisé et asservi avec une grande précision de façon à assurer la poursuite des satellites en vol avec des vitesses très variées (de quelques °/s à quelques centièmes de °/s pour traverser le ciel au-dessus de la station laser). La distance satellite-station change constamment au cours d'un passage. Si z est l'angle zénithal sous lequel est vu le satellite, la vitesse apparente en direction de la station est $(k \sin z)$.² La tourelle peut atteindre une vitesse d'environ 60°/s pour passer d'un satellite à un autre ou pour la poursuite d'un satellite au voisinage du zénith.

¹ Lorsque la cible se situe à environ 400 km d'altitude, le passage ne dure que 5 mn, du lever au coucher du satellite au-dessus de la station d'observation.

² k vaut par exemple 2 600 m/s pour LAGEOS et 6 700 m/s pour STARLETTE.

En effet, les passages de satellites ayant des durées variables, le système de poursuite doit être capable de suivre avec la même précision un satellite bas (durée de passage d'environ 5 mn pour GFZ-1 par exemple et d'une dizaine de minutes pour les satellites de type STELLA) et un satellite haut (durée supérieure à une heure pour LAGEOS, de plusieurs heures pour les satellites GPS, GLONASS et ETALON). Il est évidemment plus difficile de poursuivre précisément un satellite bas étant donné que le télescope doit se déplacer très rapidement. Ceci est une des particularités d'un télescope de station de télémétrie laser par rapport à un télescope classique d'astronomie. Par exemple, au cours du développement de la FTLRS, on s'est imposé de pouvoir poursuivre au zénith avec une très grande vitesse. Heureusement, une erreur de pointé induit une réduction du signal de retour relativement faible [Degnan, 1993]. Le système émetteur doit aussi permettre une divergence adéquate du faisceau laser et le système collecteur permettre de recevoir assez de photons de retour.

D'autre part, étant donné le nombre déjà important et croissant de cibles à observer, le système de poursuite doit être capable de passer rapidement d'un satellite à un autre. Il faudrait même avoir la capacité de poursuivre quasi-simultanément deux satellites en même temps¹. Ainsi, on peut citer les satellites T/P et JASON-1 qui seront sur la même orbite et dont les passages au-dessus d'une même station ne seront séparés que de quelques minutes. Certes, au cours de la phase de validation/étalonnage de JASON-1, la priorité des observations sera donnée à ce dernier, mais les stations seront tout de même amenées à poursuivre également T/P, notamment afin d'assurer la continuité des observations et de l'étalonnage croisé entre les deux missions.

Les chemins optiques et mécaniques dans le télescope et le système de poursuite sont également à considérer. Tout système d'alignement du chemin optique sur les axes mécaniques présente en effet des erreurs difficiles à mesurer aisément à un niveau d'exactitude de quelques millimètres. Les systèmes pour lesquels les chemins optiques d'émission et de réception sont séparés, et particulièrement ceux utilisant un coudé à 4 ou 5 miroirs, sont sujets à des erreurs de translation fonction de la position de la monture. L'alignement des optiques sur les axes mécaniques est en effet extrêmement difficile à réaliser exactement. L'alignement courant, nécessaire compte tenu notamment des décalages thermiques durant le fonctionnement, ne laisse certainement pas le temps nécessaire pour réaliser un alignement parfait, si tant est qu'un alignement parfait soit possible [Appler, 1986].

Le rayonnement solaire et d'autres effets thermiques, des désalignements mineurs pendant la maintenance et/ou le réglage du laser, les perturbations mécaniques du laser et de la monture, les déviations de l'axe d'azimut par rapport à la verticale dues notamment aux réglages représentent quelques causes supplémentaires probables d'erreurs d'alignement.

4.5.b Cas de la FTLRS

L'expérience montre que, dans le cas d'observations de satellites à altitudes relativement basses, la poursuite de la FTLRS présente des fluctuations pouvant atteindre jusqu'à 15-20". L'amplitude des mouvements de la tourelle de la station mobile est inférieure à 10", mais un problème de jeu mécanique existe. En outre, en présence de vent, ces jeux mécaniques appauvrissent la qualité de la poursuite.

Les mouvements de la tourelle sont importants au zénith seulement, c'est-à-dire quand les vitesses de poursuite sont un peu plus importantes. Le défaut est alors plus grand, mais les variations sont toujours inférieures à 10". En principe, ceci n'est a priori pas un facteur limitant puisqu'il y a très peu de poursuite de satellite nécessitant une divergence <10". Cependant, cette qualité de poursuite est insuffisante pour les expériences de transfert de temps. C'est pourquoi le programme de T2L2 a accepté de financer une étude puis la mise en place des modifications à réaliser pour compenser ce problème qui serait extrêmement limitant dans ce type d'expérience.

¹ Par exemple, observer l'un quelques minutes puis l'autre, les superpositions de passages dans les plannings d'observations étant de plus en plus fréquentes.

5. Autres sources importantes d'inexactitude

5.1. Signature du satellite

La signature du satellite est un facteur limitatif en termes d'exactitude. Cela correspond à l'effet de la répartition géométrique des rétro-réflecteurs sur le satellite, de leur taille, de leur qualité et de leur réponse aux photons incidents. Cet effet se traduit par une asymétrie de la distribution des résidus laser qui se trouve alors plus ou moins, selon les satellites, « étirée » vers les plus grandes distances (voir Figure 2.25). La Figure 2.26 illustre la grande diversité de disposition des rétro-réflecteurs sur les cibles spatiales observées (sphère, plan, couronne, polyèdre). La correction des effets de signature des satellites doit tenir compte de la modélisation d'une correction optique, d'une correction de centre de masse ainsi que du bilan de liaison¹ (réponse impulsionnelle). Les corrections appropriées pour réduire les observations laser au centre de masse du satellite dépendent à la fois des paramètres du système de poursuite et du traitement des données. Les études sur la signature des satellites ont conduit au développement de modèles et de tests des corrections de centre de masse pour les satellites sphériques, d'un modèle pour la couronne de T/P et de recherches sur les effets d'un panneau plan ainsi que sur la rotation des satellites.

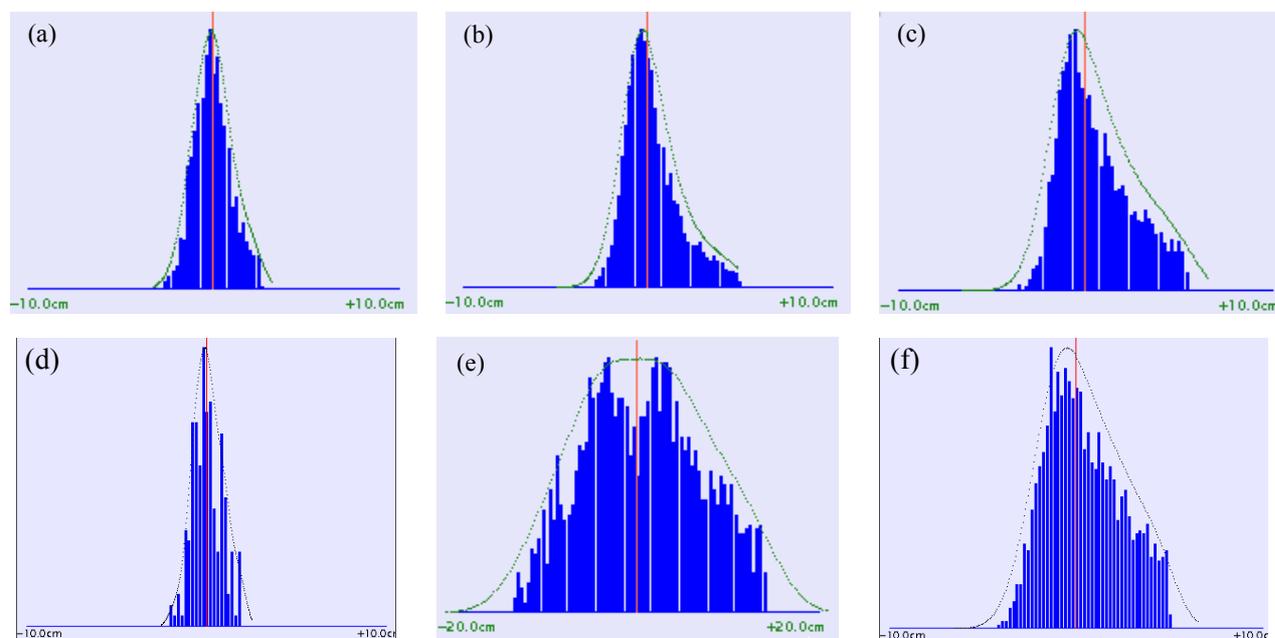


Figure 2.25 : Effet de la signature des satellites sur les histogrammes des résidus laser pour les satellites suivants : (a) STELLA, (b) LAGEOS-1, (c) TOPEX/POSEIDON, (d) WESTPAC, (e) GLONASS 80 et (f) AJISAI. Pour GLONASS, la distribution des résidus n'est pas uniforme et présente une lacune en son centre en raison d'un trou dans la répartition des rétro-réflecteurs au centre du panneau.

¹ Le bilan de liaison correspond au nombre de photons revenant de la cible par rapport à celui envoyé par impulsion laser.

Ce problème de correction de la signature des satellites devient essentielle dans la recherche d'une exactitude accrue et bien meilleure que celle atteinte lors de la conception des cibles (1 m contre 1 cm actuellement). Ce problème est également lié au nombre important de petits rétroreflecteurs laser à la surface des cibles¹ dont plusieurs peuvent renvoyer le faisceau laser émis par la station.

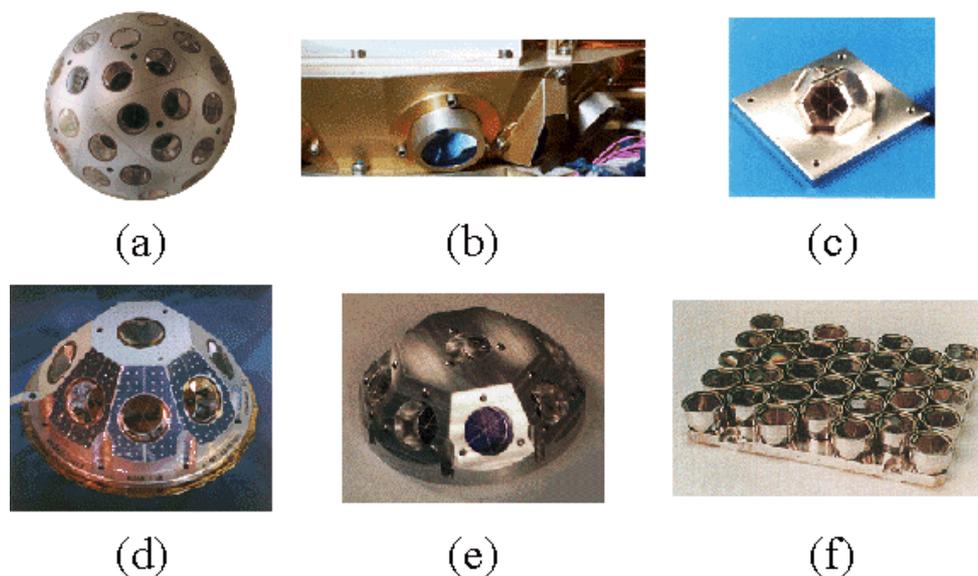


Figure 2.26 : Illustration de la diversité de disposition des rétroreflecteurs laser sur les satellites. **(a)** satellite STELLA ; **(b)** couronne de rétroreflecteurs du satellite SUNSAT ; **(c)** les 4 rétroreflecteurs du satellite CHAMP répartis sur un prisme de 5 cm de diamètre ; **(d)** ensemble des 9 rétroreflecteurs répartis sur un cône de 20 cm de diamètre embarqué sur les satellites ERS-1 et -2 et prévu pour ENVISAT ; **(e)** ensemble des 9 rétroreflecteurs répartis sur un cône de 18 cm de diamètre embarqué sur le satellite GFO-1 et prévu pour les satellites JASON-1 et ICESAT ; **(f)** panneau des 32 rétroreflecteurs des satellites GPS (239x194x37 mm³).

EFFETS DE LA DISPOSITION DES RETROREFLECTEURS

Le signal laser, initialement gaussien, est successivement modifié par la fonction de transfert de l'atmosphère², le nombre de rétroreflecteurs renvoyant de la lumière, à nouveau l'atmosphère et enfin la fonction de transfert du photodétecteur. En général, l'émission, la détection et l'atmosphère donnent lieu à une largeur à mi-hauteur inférieure ou égale à 30 ps de l'impulsion reçue. La signature du satellite, due au grand nombre de coins de cube visibles en même temps, induit une erreur variant de 1 à 5 cm, mais qui peut être modélisée. Les effets systématiques dépendent de la taille et des caractéristiques du satellite, du temps de réponse du détecteur et de la méthode de chronométrie employée [Kasser et Lund, 1994a].

Comme nous l'avons vu au cours du premier chapitre, un panneau de rétroreflecteurs laser est un dispositif passif utilisé pour les cibles en télémétrie laser. Ce panneau est constitué de plusieurs rétroreflecteurs précisément placés en orientation et position (généralement au niveau de 1° et 1 mm respectivement) par rapport à des points fixes ou des axes. La précision de cette localisation permet de réaliser des mesures de distance au niveau du centimètre, après détermination d'une correction de

¹ L'emploi de petits coins de cubes est lié aux contraintes thermiques dans l'espace.

² L'atmosphère ne change pas significativement la polarisation du faisceau laser.

centre de masse du satellite. Le centre de masse est relié à la distance apparente par une quantité dépendant de l'angle d'incidence local. La détermination du centre de masse du satellite est un point essentiel dans la recherche d'une exactitude toujours accrue des mesures. Concrètement, la détermination exacte de la distance au centre de masse du satellite dépend aussi de l'exactitude de la connaissance de l'attitude à 3 axes du satellite au moment de chaque mesure de distance, de sorte que le vecteur entre le centre de masse et le point de réflexion, i.e. l'endroit où la mesure est faite, puisse être déterminé.

Lorsque le retour se fait au niveau du simple photo-électron, un écart d'orientation entre l'axe normal du panneau de rétro-rélecteurs et celui défini par la direction rétro-réflexeur-télescope peut introduire une dispersion des mesures [Samain et al., 1998]. Les réponses des rétro-rélecteurs sur un satellite peuvent être considérées comme indépendantes. La largeur des impulsions est assez grande pour que les retours individuels des rétro-rélecteurs se superposent dans le temps et interfèrent de manière cohérente. Cette interférence est aléatoire et le temps entre les impulsions est trop long pour que deux impulsions successives puissent être corrélées. Cela permet ainsi de sommer les impulsions, distribuées temporellement, revenant des rétro-rélecteurs individuels.

Un autre problème de la correction de la signature du satellite est de déterminer la distance de quelques points fixes du satellite, le centre de masse de préférence, au point effectif de réflexion sur le panneau de rétro-rélecteurs (recherche du « centre de phase laser »). Dans le cas de satellites sphériques, comme LAGEOS ou STARLETTE, la correction de distance du centre de masse au plan de réflexion est une constante, compte tenu d'un nombre de coins de cube discret. Cet effet a notamment été étudié pour les satellites LAGEOS et ETALON [Appleby, 1995]. Dans le cas de la Lune ou des satellites comme GPS et GLONASS ayant des rétro-rélecteurs répartis dans un plan, la signature de la cible spatiale dépend de la configuration géométrique entre la station et les coins de cubes réfléchissant la lumière laser. L'effet de l'orientation initiale du panneau de rétro-rélecteurs laser par rapport à l'orientation station-satellite a été étudié dans le cas des mesures de télémétrie laser Lune [Samain et al., 1998]. Une autre étude est en cours pour le cas des satellites GLONASS [Barlier, 2000]. Pour un panneau de rétro-rélecteurs annulaire, comme sur T/P, le plan de réflexion est également fonction de l'angle de visée et ne coïncide pas avec le centre de masse du satellite (voir Figure 2.27 et Figure 2.28). Dans ce cas, une table de conversion de distance est établie pour des angles de vue différents [Schwartz, 1990]. Actuellement, il existe une modélisation de cette signature de T/P en fonction de la longueur d'onde d'émission, de la station, du détecteur employé, de l'angle d'incidence du faisceau laser et de l'attitude du satellite.

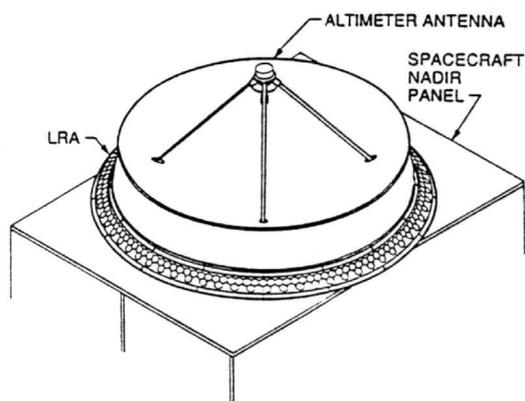


Figure 2.27 : Schéma de la couronne des rétro-rélecteurs laser placée sous l'antenne de l'altimètre de TOPEX/POSEIDON. Le diamètre de cette couronne est d'environ 85 cm (d'après [Schwartz, 1990]).

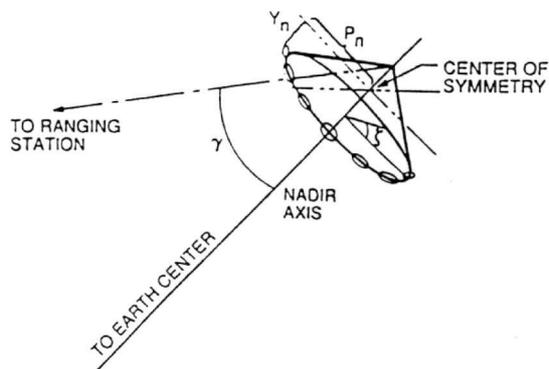


Figure 2.28 : Géométrie de l'influence de la direction de la station sur la correction de centre de masse dans le cas de TOPEX/POSEIDON (d'après [Schwartz, 1990]).

La correction de l'effet de signature est plus facile lorsqu'il y a symétrie dans la disposition des rétro-rélecteurs. Généralement, les rétro-rélecteurs sont distribués uniformément (autour de l'axe du nadir dans le cas de T/P) à la fois en nombre et en orientation.

Par exemple, les effets de la signature du satellite LAGEOS sont de l'ordre de 1 à 6 mm et de 10 à 30 mm pour le satellite TOPEX/POSEIDON. Pour illustrer l'importance de ce point dans la recherche d'une exactitude sub-centimétrique, ces valeurs sont à comparer à la contribution au bilan d'erreur global des données météorologiques (pression 0,2 mb soit 0,5 à 2 mm, humidité 1 mm) et des mesures d'étalonnage (1 à 10 mm) [Neubert, 1995]. Les corrections des effets de signature du satellite sont donc capitales, notamment dans toutes les études d'océanographie spatiale menées à partir de l'analyse des données du satellite TOPEX/POSEIDON étalonnées par télémétrie laser¹.

AUTRES EFFETS LIES A LA SIGNATURE DU SATELLITE

Le chemin optique parcouru à l'intérieur d'un coin de cube devrait être identique quel que soit l'angle d'incidence de la lumière, ou du moins présenter des différences négligeables. Cependant, le satellite change légèrement la forme du front d'onde de la lumière de retour.

La signature du satellite est à l'origine de plusieurs effets : le déplacement de la moyenne des résidus laser et du niveau du signal de retour. Il faut tenir compte de la manière dont sont filtrées les mesures laser au niveau des stations afin de ne pas supprimer involontairement des informations liées à la signature du satellite. Par exemple, une variation de 2,5 à 3 σ dans la coupure des données peut entraîner une différence de 1 cm sur la correction du centre de masse lorsque l'effet de signature est prépondérant, comme dans le cas des satellites T/P, LAGEOS ou AJISAI. Le même effet se produit quand la coupure varie entre 2 et 2,5 σ . L'énergie du laser envoyée au cours de la poursuite joue également un rôle. Dans le cas de TOPEX/POSEIDON, par exemple, satellite très sensible à ce paramètre, l'effet de la signature du satellite est totalement « noyé » dans le signal des impulsions laser quand l'énergie laser envoyée est trop importante.

Un autre point important pour le niveau d'exactitude recherché est la nécessité d'être cohérent dans l'utilisation d'un même détecteur pour tous les satellites observés, tandis que certaines stations utilisent une photodiode ou un MCP selon le type de satellite observé. En effet, la correction de la signature du satellite peut dépendre du type de détecteur utilisé, comme dans le cas des satellites

¹ Qualité d'orbitographie de 2 cm, signal océanique recherché au niveau centimétrique et effet de signature du satellite allant jusqu'à 3 cm.

GLONASS [Barlier et al., 2000]. Dans le cas de détecteurs simple photon, les modèles de correction de centre de masse sont obtenus par simple convolution de l'impulsion laser gaussienne avec la réponse du satellite, mais cela s'avère bien plus complexe dans le cas d'une détection en mode multiphoton.

La composition du panneau de rétro réflecteurs laser du satellite a également un effet sur le bilan de liaison. En réalité, il n'y a jamais 100% d'efficacité, quelle que soit l'orientation des rétro réflecteurs, en raison de la réflectivité imparfaite du traitement métallique du fond des coins de cubes, des trois réflexions nécessaires au transit de la lumière dans le coin de cube et du traitement de surface. Pour les rétro réflecteurs traités, type employé pour la plupart des satellites, la réflexion est d'environ 70% en moyenne. Pour des satellites comme LAGEOS, dont les rétro réflecteurs ne sont pas traités, le bilan de liaison peut être considérablement diminué. Quand on regarde le signal de retour d'un panneau de rétro réflecteurs non traités avec différentes orientations, le niveau de retour peut en effet tomber bien en-dessous de 70% et parfois même au-dessous de 50%.

La polarisation peut également être modifiée par la réflexion sur les coins de cube du satellite. Cette variation de polarisation dépend de l'angle de l'incidence du faisceau laser et des caractéristiques des rétro réflecteurs. Des calculs théoriques ont suggéré que les satellites équipés de coins de cube non traités (uniquement le cas des satellites LAGEOS-1 et -2 pour le moment) peuvent fortement et aléatoirement dépolariiser la lumière laser incidente. Il en résulte alors une perte considérable d'énergie du signal de retour au niveau du photodétecteur pour les mêmes orientations du satellite. Heureusement, la majorité des satellites a des coins de cube à faces arrières métallisées ne montrant pas cet effet.

Ces effets de dépolariisation de la lumière peuvent compromettre fortement le bilan de liaison sur les satellites LAGEOS-1 et -2, perte d'autant plus gênante pour une station comme la FTLRS dont le diamètre du collecteur de photons est faible et pour laquelle la sélection entre les voies d'émission et de réception se fait par un jeu de polarisation.

L'amplitude du signal réfléchi par un coin de cube donné est directement proportionnelle à la section efficace effective du coin de cube dans la direction de transmission du signal. La section efficace observable de chaque coin de cube dépend de l'orientation de la face d'entrée du rétro réflecteur par rapport à l'observateur. Il est à noter que les coins de cube offrant la plus grande section efficace sont ceux situés le plus près de l'observateur. La section efficace optique A d'un rétro réflecteur ayant une ouverture circulaire de rayon r est donnée par :

$$A = 2r^2[\sin^{-1}(\mu) - \sqrt{2}\mu \tan(i')] \cos(i) \text{ où } \mu = \sqrt{1 - 2 \tan^2(i')},$$

avec i est l'angle d'incidence de la lumière dans le coin de cube, et i' l'angle de réfraction [Schwartz, 1990]. Pour les coins de cube pleins, comme ceux typiquement employés sur les satellites, cette distance doit en outre être multipliée par l'indice de réfraction n_{CCR} du matériau à cause de la vitesse de propagation de la lumière plus lente dans le rétro réflecteur.¹

Les points effectifs de réflexion dépendant du centre de l'impulsion laser incidente doivent être réduits au centre de masse du satellite. Cette correction dépend de l'angle d'incidence, de la largeur d'impulsion laser, des moyens de détection et de la réponse impulsionnelle du détecteur [Jiyu, 1986], [Schwartz, 1990].

¹ Par exemple, pour $\lambda=532$ nm, la silice fondue a un indice de réfraction de 1,455.

EXEMPLE D'ETUDES TECHNOLOGIQUES

On essaie de réaliser de nouveaux panneaux de rétroreflecteurs de taille et de disposition telles qu'il n'y ait qu'une seule réponse possible par impulsion laser envoyée. Le bilan de liaison nécessaire est obtenu en mettant des coins de cube de grande taille (une dizaine de centimètres d'ouverture). Les effets d'aberration de vitesse et ceux liés au changement d'angle d'incidence sont alors corrigés [Kasser et Lund, 1994a].

A ce niveau, des études technologiques sont menées afin de concevoir des cibles spatiales avec une signature de satellite aussi faible que possible. Par exemple, ce genre d'étude a conduit à la réalisation du satellite WESTPAC (altitude de 835km) (voir Figure 2.29). Ce satellite, mis en orbite par le réseau Western Pacific en 1997, a été spécialement développé par une équipe russe pour réaliser des mesures de très haute précision. En effet, son centre de masse est déterminé à mieux que 1 mm et l'erreur maximale liée à la forme du satellite est minimisée. En effet, l'orientation mutuelle des rétroreflecteurs ainsi que leur bafflage¹ assurent la réflexion du faisceau laser par un seul rétroreflecteur à la fois quel que soit l'angle d'incidence du faisceau laser. Ce type de satellite est très utile pour tous les tests visant à améliorer l'exactitude des mesures laser.

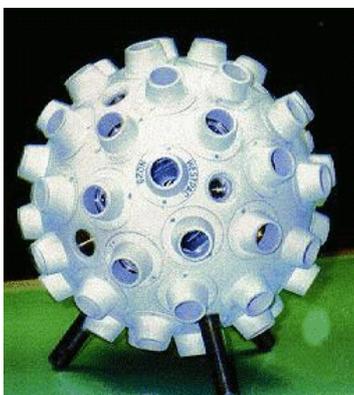


Figure 2.29 : Satellite WESTPAC.

Le satellite WESTPAC tourne sur lui-même lentement avec une période de rotation d'environ 1 mn. L'angle d'acceptance d'un des rétroreflecteurs est d'environ 12° et les baffles ont un diamètre de 20 mm. Cependant, le nombre moyen de rétroreflecteurs en visibilité d'une station d'observation n'est que de 0,7. Ce satellite est donc difficile à poursuivre tout d'abord en raison du faible bilan de liaison (diffraction important, petits coins de cubes). La rotation et le bafflage des rétroreflecteurs de ce satellite sont également la cause d'une absence d'écho laser pendant des durées pouvant aller jusqu'à 10-12 s, régulièrement au cours du passage observé, selon l'orientation de l'axe de rotation du satellite par rapport à la station d'observation. La poursuite devient donc parfois délicate.

EXEMPLE D'ETUDE DANS LE CAS DU SATELLITE AJISAI

Comme AJISAI est plus grand que les autres satellites géodésiques sphériques et comme ses rétroreflecteurs sont peu abondamment distribués sur sa surface (voir Figure 1.4), l'effet de signature est plus important sur ce satellite. Une modélisation faite par [Otsubo et al., 1996] a montré que la distribution des résidus est très biaisée et que cela augmente les distances mesurées de 40 ou 50 mm. Dans le cas de stations fonctionnant en mode de détection multiphoton, cette même modélisation a

¹ Les rétroreflecteurs laser sont décalés vers l'intérieur du satellite.

montré que la correction du centre de masse d'AJISAI varie de plus de 30 mm par rapport à l'angle d'incidence. Dans le cas des stations travaillant en détection simple photo-électron, la modélisation de [Otsubo et al., 1997] coïncide totalement avec les observations de la station d'Herstmonceux (GB). Cette modélisation des impulsions laser revenant après réflexion sur le satellite AJISAI a été faite pour des conditions idéales :

- le signal est toujours maintenu au niveau du simple photon,
- l'angle d'incidence de l'impulsion laser est réparti vers le satellite de manière égale,
- le bruit instrumental de la station de télémétrie laser est nul,
- le nombre de données est suffisant.

Comme la distribution des résidus est très dissymétrique par rapport à la valeur moyenne, une partie de la « queue » de la distribution (les contributions des rétroreflecteurs plus lointains) est rejetée, comme du bruit de données. La procédure d'élimination du bruit est propre à chaque station. Dans le cas de Grasse par exemple, on élimine les résidus au-delà de $2,5\sigma$ tandis qu'à Herstmonceux le découpage se fait à 3σ . Le choix entre ces deux valeurs de troncature n'est pas indifférent, comme pour l'analyse des mesures, et peut introduire des biais.

5.2. Effets de l'atmosphère

Parmi les différentes techniques de géodésie spatiale, la télémétrie laser est la méthode la moins sensible aux effets de propagation liés à des instabilités spatiales et temporelles de l'atmosphère. En effet, comparées aux ondes radioélectriques, les fréquences lumineuses employées en télémétrie laser sont complètement insensibles aux effets de l'ionosphère et leur propagation est beaucoup moins dépendante de la distribution de vapeur d'eau. L'effet de cette dernière sur les distances mesurées par la technique laser est environ 70 fois plus faible que sur les distances mesurées avec des fréquences radioélectriques [Hauser, 1989]. La composante sèche de l'atmosphère est donc la principale source de correction de propagation en télémétrie laser [Samain et al., 1998].

Les inhomogénéités de l'atmosphère sont à l'origine de phénomènes d'absorption, de réfraction, de diffusion aléatoire et de dispersion. Les variations d'indice, notamment en raison des variations spatiales de la densité locale, influencent la propagation de l'impulsion laser de différentes manières. Les deux effets majeurs sont :

- une variation de la vitesse de propagation de l'onde lumineuse¹,
- une déviation du faisceau laser liée à la loi de Descartes au fur et à mesure qu'il se déplace dans des couches atmosphériques d'indices de réfraction différents (voir Figure 2.30).

L'effet de courbure du faisceau lumineux est bien moins important que le ralentissement de la vitesse de propagation. L'indice de réfraction de l'air dépend de la longueur d'onde et des paramètres météorologiques en chaque point du chemin optique.

¹ La vitesse de propagation de l'impulsion lumineuse augmente progressivement lors de sa traversée de l'atmosphère depuis la station au sol jusqu'aux régions de plus faible densité dans les plus hautes altitudes.

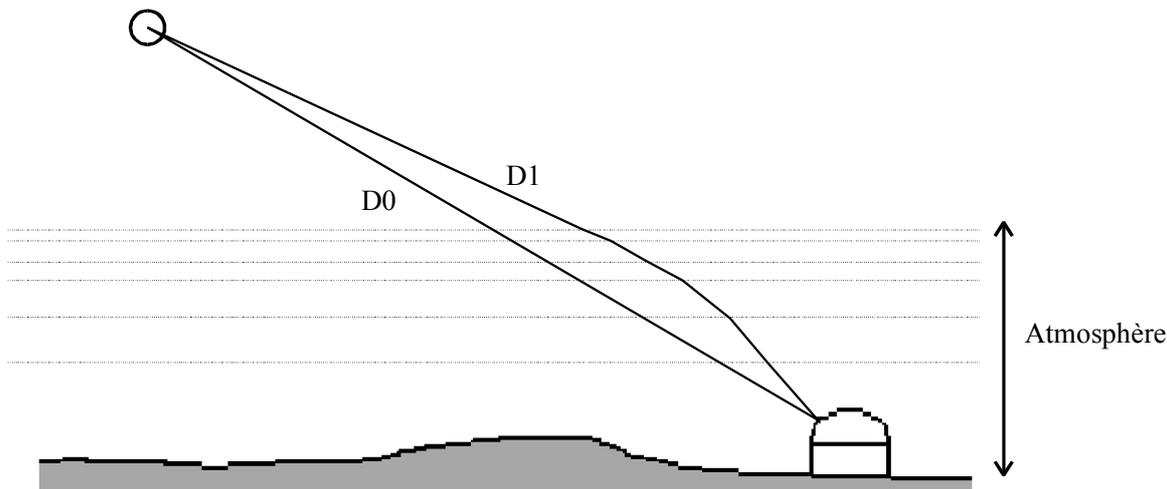


Figure 2.30 : Schématisation exagérée de l’effet de courbure du faisceau laser lié à la propagation dans l’atmosphère. D0 correspond à la distance réelle que l’on désire mesurer et D1 représente la distance effectivement mesurée.

La présence de l’atmosphère implique une correction de la distance mesurée. On peut représenter l’atmosphère comme un empilement de couches de gaz d’épaisseurs variables, chacune étant caractérisée par un indice de réfraction $n = \frac{c}{v}$ où c est la vitesse de la lumière dans le vide et v la vitesse dans le milieu considéré (il y a aussi de très petits effets relativistes à prendre en compte). La distance aller-retour peut donc s’exprimer comme suit :

$$D = vt = \frac{c}{n(\lambda, P_a, P_v, T)} \cdot t$$

où t est le temps de vol aller-retour, λ la longueur d’onde, P_a la pression atmosphérique, P_v la pression de vapeur d’eau et T la température.

La correction de vitesse est donnée par :

$$C = \int_{station}^{cible} (n(s) - 1) ds = \int_{station}^{cible} \frac{(n(h) - 1)}{\sin \theta} dh$$

où ds est l’élément d’intégration le long du chemin optique et θ l’angle avec la normale à la couche précédente.

La correction du ralentissement du faisceau dans l’atmosphère représente quelques mètres sur la distance station-satellite et dépend de la hauteur du satellite. Elle vaut environ 2 m à la verticale et est de l’ordre de 10 m à 15° de hauteur. La correction de courbure du faisceau est en général négligeable par rapport à celle en vitesse quand les cibles sont lointaines (quelques milliers de km) et élevées dans le ciel (hauteur > 10°). En effet, elle est inférieure à 4 cm à 10° de hauteur et elle est inférieure à 1 cm au-dessus de 30° de hauteur.

MODELE DE MARINI-MURRAY POUR LA CORRECTION DE REFRACTION ATMOSPHERIQUE

Dans l'analyse des observations de télémétrie laser, on utilise habituellement le modèle de Marini-Murray [Marini et Murray, 1973] pour corriger les distances mesurées des effets de la troposphère (modèle adopté comme référence par l'ILRS). Ce modèle est basé sur la décomposition de l'atmosphère en une série de couches à symétrie sphérique et infiniment minces. Le rayon lumineux reste ainsi dans un plan. L'utilisation de ce modèle offre l'avantage de ne nécessiter que des mesures météorologiques au niveau du site géodésique.

Le modèle de Marini-Murray donne l'indice de réfraction le long du chemin optique du faisceau lumineux en fonction des paramètres météorologiques au sol, de la longueur d'onde du laser λ (en μm) en chaque point du parcours du laser. Cette correction dépend également de la quantité d'atmosphère traversée, c'est-à-dire de la hauteur du satellite. On tient compte de la pression atmosphérique P_a (en mb), de la température T (en K) et de la pression partielle de vapeur d'eau P_v (en mb) liée au pourcentage d'humidité. On considère que la variabilité radiale des paramètres météorologiques est gouvernée par les équations de l'équilibre hydrostatique, des pressions partielles et de la loi des gaz parfaits [Degnan, 1993].

La pression de vapeur d'eau est reliée au pourcentage d'humidité et à la température au sol par la relation suivante :

$$P_v = U \cdot 6,11 \cdot 10^{\frac{7,5(T-273,15)}{237,3+(T-273,15)}}$$

où U est le taux d'humidité relative (en %). Il est donc important de mesurer précisément ces différents paramètres afin de bien modéliser les variations de l'indice de réfraction le long du trajet station-satellite.

L'indice de réfraction donné par le modèle de Marini-Murray¹ s'écrit :

$$N = (n - 1) \cdot 10^6 = 80,343 \cdot f(\lambda) \cdot \frac{P_a}{T} - 11,3 \cdot \frac{P_v}{T}$$

où $f(\lambda) = 0,9650 + \frac{0,0164}{\lambda^2} + \frac{0,000228}{\lambda^4}$ est le facteur de dispersion et N le co-indice de groupe de l'air. Ce modèle est simple et on peut noter que le coefficient lié à vapeur d'eau est indépendant de la longueur d'onde optique du rayonnement traversant le milieu.

En intégrant sur une colonne d'air verticale entre la station et le satellite, la correction en distance ΔR (en m) donnée par ce modèle s'écrit :

$$\Delta R = \frac{f(\lambda)}{f(\Phi, H)} \left[\frac{A + B}{\sin(E) + \frac{B}{\sin(E) + 0,01}} \right]$$

¹ Le modèle de Marini-Murray est une formule approchée pour les longueurs d'onde optiques. Il existe d'autres modèles plus élaborés comme [Owens, 1967].

avec

$$\begin{cases} A = 0,002357P_a + 0,000141P_v \\ B = (1,084 \cdot 10^{-8})P_aTK + \frac{P_a^2}{T} \left(3 - \frac{1}{K} \right) \\ K = 1,163 - 0,00968 \cos(2\Phi) - 0,00104T + 0,00001435P_a \\ f(\Phi, H) = 1 - 0,0026 \cos(2\Phi) - 0,00031H \end{cases}$$

où Φ est la latitude de la station, H son altitude (en km) et E la hauteur du satellite dans le ciel.

La Figure 2.31 donne la correction en distance du modèle de Marini-Murray en fonction de la hauteur du satellite dans le ciel. Pour une propagation horizontale du faisceau laser comme lors des tirs sur cible au sol, l'effet de l'atmosphère sur la mesure de distance est d'environ 0,5 mm/km.

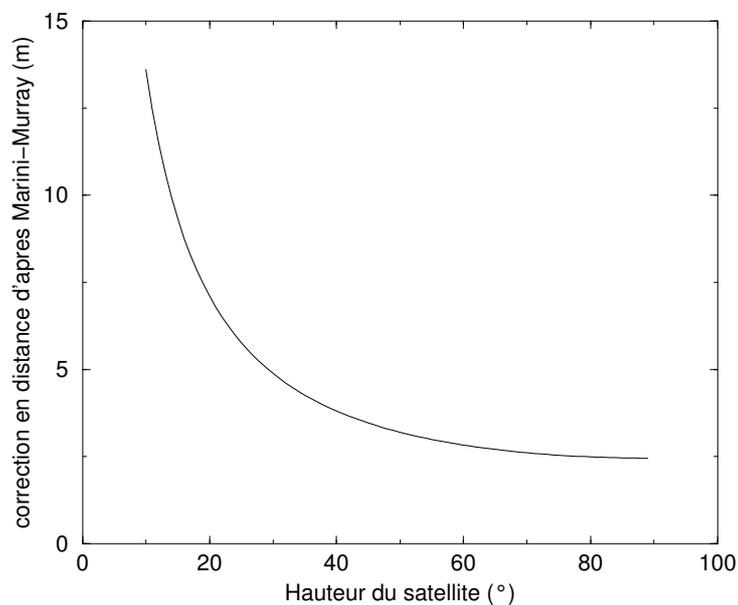


Figure 2.31 : Correction sur la distance station-satellite liée à la propagation dans l'atmosphère du faisceau laser et donnée par le modèle de Marini-Murray au plateau de Calern ($H = 1,270$ km, $\Phi = 43,75^\circ$, $\lambda = 532$ nm) pour des conditions atmosphériques moyennes ($P_a = 1$ atm, $T = 15^\circ\text{C}$, $U = 50\%$).

AUTRES EFFETS DE LA PROPAGATION DANS L'ATMOSPHERE

Outre un ralentissement de la propagation ainsi qu'une courbure du trajet du faisceau lumineux, l'atmosphère a d'autres effets sur le faisceau laser qui la traverse. Les effets supplémentaires de l'atmosphère sont liés à une atténuation du faisceau lumineux, à la couverture des cirrus et à la turbulence. Le lecteur pourra trouver des informations plus complètes à ce propos dans l'article [Degnan, 1993]. On peut résumer ces effets comme suit :

- L'atténuation atmosphérique résulte de la diffusion de la lumière par les aérosols (diffusion de Mie) et par les molécules (diffusion de Rayleigh). Il faut également tenir compte de l'existence de fortes raies d'absorption de différents constituants atmosphériques, notamment la vapeur

d'eau, l'oxygène, le dioxyde de carbone et l'ozone à certaines longueurs d'onde. Il faut alors écrire l'équation de la transmission atmosphérique en un endroit et une altitude au-dessus du niveau de la mer.

- La présence de nuages épais empêche de faire des mesures de télémétrie laser aux longueurs d'onde optique. Néanmoins, la couverture nuageuse des cirrus est tout de même à prendre en compte. En effet, même lorsque le ciel paraît relativement clair, des cirrus invisibles à l'œil nu depuis le sol sont présents environ la moitié du temps dans la plupart des sites d'observations. D'après le spectre d'atténuation de l'atmosphère, certaines longueurs d'onde laser sont à éviter. Il faut alors considérer l'épaisseur optique effective de l'atmosphère.
- Enfin, la turbulence atmosphérique produit une distorsion du front d'onde spatial des faisceaux électromagnétiques qui se propagent. Elle génère aussi une diffusion, une scintillation et une fluctuation dans l'intensité reçue en un point du détecteur. L'effet total de la turbulence atmosphérique constitue donc un sujet complexe pour lequel on se référera pour plus de détails à [Degnan, 1993], [Léna, 1996] et [Fante, 1980].

ERREURS SUR LA CORRECTION DE PROPAGATION ATMOSPHERIQUE

La source d'erreur limitative est l'incertitude sur le temps de propagation lié à la transmission atmosphérique. Il est possible de mesurer directement le temps de propagation dans l'atmosphère avec les techniques de télémétrie laser deux couleurs, techniques qui nécessitent des précisions de l'ordre de la picoseconde dans les mesures des différences de temps de vol dans chaque longueur d'onde. Cependant, les effets d'étalement de l'impulsion de beaucoup de satellites (signature de satellite) rendent ces mesures de temps très difficiles à faire avec une grande précision [Degnan, 1993], [Lucchini, 1995]. Beaucoup de groupes développent cette technique, mais actuellement aucune station ne fonctionne encore réellement en deux couleurs étant données les difficultés technologiques à surmonter.

Les différentes sources d'erreurs résiduelles après correction du délai de propagation du faisceau laser dans l'atmosphère par le modèle de Marini-Murray sont :

- les erreurs liées aux mesures des paramètres météorologiques (relativement faciles à analyser),
- les écarts entre les profils verticaux effectifs et ceux modélisés (à cause du vent par exemple),
- l'impossibilité de prendre en compte des effets de gradients transversaux avec un modèle en couches sphériques.

La qualité des mesures de la station météorologique est essentielle. Les paramètres météorologiques doivent être mesurés le plus près possible du point de référence des distances (croisée des axes du télescope). Il faut disposer de capteurs précis les plus linéaires possible entre 0 et 1 bar pour la pression, -10 et 25°C pour la température, et 0 et 100% d'humidité. Une attention particulière doit être portée sur la localisation des capteurs météorologiques afin de ne pas induire d'erreur sur les variables mesurées. Des biais importants ont été introduits dans le passé en raison d'un emplacement impropre de ces instruments. Ainsi par exemple, durant des années, la station météorologique du laser Lune était placée sur le toit du bâtiment et malheureusement au-dessus de la porte, d'où des variations artificielles des paramètres météorologiques. Ceci a été corrigé depuis car cette source d'erreur est devenue plus critique compte tenu du niveau de précision désormais atteint.

La localisation de l'instrumentation mesurant les paramètres météorologiques doit donc être choisie avec soin et l'étalonnage de ces appareils doit être soigneusement effectué. Les instruments météorologiques doivent être installés à la même hauteur que les systèmes d'émission et de réception. Par exemple, le capteur de température doit être placé suffisamment loin de toute source artificielle de chaleur et protégé de l'incidence directe du Soleil pour éviter une erreur dans la mesure de la

température ambiante. En pratique, on fait une seule mesure au niveau du sol et non pas le long du trajet.

D'autre part, il est nécessaire de mesurer les paramètres météorologiques au niveau du télescope non seulement au début du passage mais aussi au cours du passage car ils peuvent varier (surtout pour des passages qui peuvent durer une heure ou plus comme pour les satellites LAGEOS, ETALON, GLONASS ou GPS).

Afin d'estimer la sensibilité de la correction de propagation dans l'atmosphère donnée par le modèle de Marini-Murray en fonction des paramètres d'entrée, j'ai déterminé les dérivés partielles de cette correction en distance par rapport aux variables météorologiques. Celles-ci s'écrivent, pour le paramètre météorologique X :

$$\frac{\partial \Delta R}{\partial X} = \frac{f(\lambda)}{f(\Phi, H)} \left[\frac{\frac{\partial A}{\partial X} + \frac{\partial B}{\partial X}}{\sin E + \frac{B(A+B)}{\sin E + 0,01}} + (A+B) \left(-\frac{1}{\sin E + 0,01} \left(\frac{1}{A+B} \frac{\partial B}{\partial X} - \frac{B}{(A+B)^2} \left(\frac{\partial A}{\partial X} + \frac{\partial B}{\partial X} \right) \right) \right) \frac{1}{\left(\sin E + \frac{B/(A+B)}{\sin E + 0,01} \right)^2} \right]$$

La Figure 2.32 illustre la sensibilité aux erreurs de mesure des paramètres météorologiques dans le cas du plateau de Calern. Il apparaît alors que les trois paramètres qui influencent le modèle atmosphérique jouent des rôles décroissants dans l'ordre suivant : pression, température puis humidité. L'humidité est en général très difficile à estimer le long du trajet, mais elle joue un faible rôle.

L'incertitude totale théorique du modèle peut s'écrire :

$$erreur = \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta R}{\partial P_a} \right)^2 \sigma_{P_a}^2 + \left(\frac{\partial \Delta R}{\partial T} \right)^2 \sigma_T^2 + \left(\frac{\partial \Delta R}{\partial U} \right)^2 \sigma_U^2}$$

où les σ représentent les incertitudes sur les mesures des paramètres météorologiques. Cette estimation est probablement un peu optimiste puisque les mesures au sol ne reflètent par la réalité des profils le long du trajet.

Le Tableau 2.4 donne les valeurs de cette erreur du modèle de Marini-Murray pour des erreurs à craindre sur les paramètres météorologiques classiques ($\sigma_{P_a} = 0,2$ mb, $\sigma_T = 1^\circ\text{C}$ et $\sigma_U = 10\%$) en fonction de la hauteur du satellite dans le ciel. Dans le cas de la FTLRS, les mesures de température sont faites au demi degré près, celles de pression à $\pm 0,1$ mb et celles d'humidité à 5-10% près.

Si on s'en tient à l'expression théorique calculée précédemment, l'erreur prédite par le modèle de Marini-Murray est de 2 mm à 20° de hauteur et de 0,6 mm à 50°. Mais en réalité l'erreur est plus élevée puisque sur des périodes de temps de l'ordre de quelques minutes, l'erreur est fonction de l'épaisseur d'atmosphère traversée et varie de 2 mm au zénith jusqu'à 1 cm pour une élévation de 15° [Samain, 1995]. Cette valeur plus importante est liée à l'écart entre les profils verticaux effectifs et modélisés, à la non prise en compte des gradients transversaux et aux effets météorologiques locaux. De temps en temps, cette incertitude pourrait augmenter en raison d'effets météorologiques locaux mal pris en compte dans la modélisation, comme les inversions de température ou, cas plus local qui concerne plus particulièrement le plateau de Calern¹, lorsque les passages observés se situent au-dessus de la mer tandis que les mesures météorologiques sont réalisées loin des côtes.

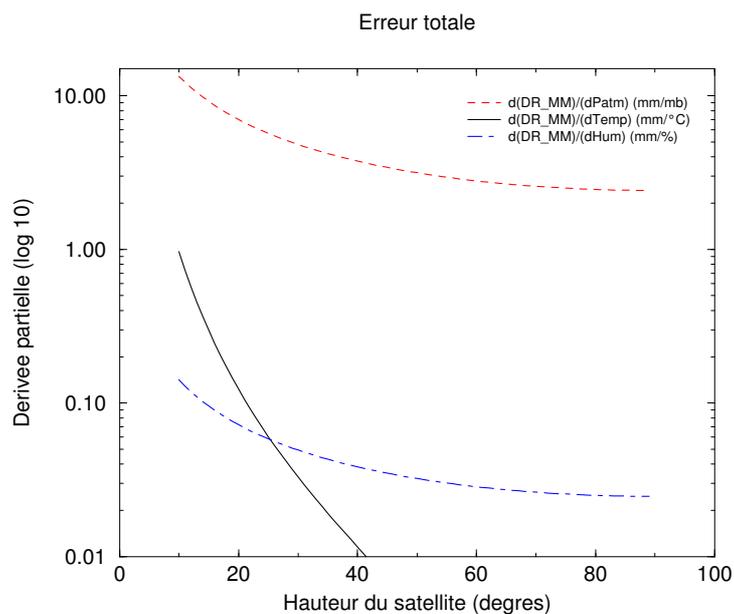


Figure 2.32 : Courbe de sensibilité des erreurs de correction en distance du modèle de Marini-Murray en fonction des erreurs de mesures des paramètres d'entrée (température en °C, pression en mb et pourcentage d'humidité).

¹ La mer se trouve à une trentaine de kilomètres au sud du plateau.

Tableau 2.4 : Erreur globale sur la correction de propagation dans l'atmosphère à partir du modèle de Marini-Murray pour différentes hauteurs de satellite. L'erreur quadratique a été estimée pour des incertitudes de pression de 0,2 mb, de température de 1°C et de 10% d'humidité relative.

Hauteur (°)	Erreur globale (mm)
10	2,8
20	1,4
30	1,0
40	0,7
50	0,6
70	0,5
80	0,5

Les paramètres météorologiques subissent d'importantes variations annuelles et journalières. Des études récentes montrent que l'erreur en distance provoquée par la mauvaise connaissance de l'atmosphère tout au long du parcours du faisceau laser peut cependant avoir une moyenne nulle sur le long terme (de l'ordre de l'année). On diminue l'erreur due à l'atmosphère à long terme (2-3 mois) et une amélioration de l'exactitude des mesures sur le court terme ne sera possible que si les effets de l'atmosphère sont mieux pris en compte.

CONCLUSION

Actuellement, l'atmosphère est une source importante d'imprécision en télémétrie laser. L'atmosphère étant mal connue, on fonctionne par modélisation (indice de réfraction variable), même si des problèmes subsistent puisque les couches ne sont pas uniformes et les paramètres météorologiques ne sont pas bien déterminés tout le long du parcours du faisceau laser.

Les limitations actuelles sont plus faibles pour les mesures de télémétrie laser que pour les techniques radioélectriques, ce qui donne un avantage au laser en terme d'exactitude, même si hélas le laser n'est pas tous temps (un ciel relativement dégagé est nécessaire).

Dans le futur, il sera possible d'utiliser des profils des composantes sèche et humide de l'atmosphère suffisamment exacts en utilisant les récepteurs GPS embarqués sur les satellites bas pour faire des sondages au limbe de l'atmosphère. Une autre méthode, basée sur les mesures à deux couleurs en SLR, permettra aussi d'être sensible à la réfraction à travers l'atmosphère sèche. L'utilisation d'un radiomètre à vapeur d'eau est également envisagée lors de la prochaine campagne de validation et d'étalonnage de JASON-1.

En conclusion, le paramètre météorologique qui influe le plus sur la qualité de la correction atmosphérique est la pression. Cependant, cette variable est en général très bien mesurée au niveau de la station et son profil bien modélisé le long de la trajectoire du faisceau laser. Le problème principal dans la correction de propagation atmosphérique est donc lié à la difficulté d'estimer le taux d'humidité le long du trajet total.

D'autre part, le modèle de Marini-Murray présente l'inconvénient d'avoir son terme sur la composante humide indépendant de la longueur d'onde du laser émis, même si l'incertitude liée à la vapeur d'eau

aux longueurs d'onde lumineuses utilisées en télémétrie laser est de l'ordre de quelques millimètres. Il faudrait, après amélioration des modèles utilisés par des mesures de télémétrie laser deux couleurs, tenir également compte des effets locaux et saisonniers de l'atmosphère afin de progresser encore sur la correction de propagation atmosphérique et donc dans la qualité finale des données laser.

6. Bilan d'erreur après analyse en laboratoire

Après la mise en place de toutes les modifications technologiques indiquées dans la quatrième partie de ce chapitre et l'analyse des différentes sources d'erreur dans les mesures laser, l'évaluation de la qualité instrumentale de la FTLRS dans sa nouvelle configuration a logiquement été entreprise. Ainsi, un véritable effort a été réalisé afin d'évaluer l'exactitude des mesures et la stabilité temporelle des biais des mesures de la FTLRS.

Dans cet objectif, la contribution au bilan d'erreur global de chaque élément a été déterminée puis analysée. Ainsi, E. Samain et moi-même avons réalisé des tests et des mesures d'exactitude, notamment afin de caractériser la chaîne de chronométrie, le photodétecteur de retour et le laser. Les premiers résultats obtenus avec cette analyse d'incertitude pas à pas ont conduit à une exactitude centimétrique. Il apparaît que la source d'inexactitude la plus importante est liée au système de chronométrie. La procédure d'étalonnage (distance de la cible d'étalonnage, intervalle de temps entre le passage de satellites et les mesures d'étalonnage) constitue également une autre source importante d'erreurs.

6.1. Etude du photodétecteur de retour

Le photodétecteur utilisé est une photodiode fonctionnant en mode Geiger avec un module de compensation placé à la sortie de la photodiode et qui permet de corriger les dérives du temps de transit. Cette C-SPAD permet d'opérer en mode de détection multi-photon en minimisant le bruit introduit par la variation du nombre de photons. Afin de caractériser les performances du système, nous avons réalisé quelques expériences sur table. L'objectif était de mesurer la sensibilité du temps de transit de la photodiode en fonction de :

- la polarisation de la lumière,
- le nombre de photons,
- la localisation des photons sur la surface sensible du photodétecteur (effet centre-bord),
- la température,
- la forme du signal Geiger (tension appliquée à la photodiode pour la sensibiliser).

La stabilité et la précision ont également été évaluées.

6.1.a Banc expérimental

Le schéma de l'expérience décrite ci-après est donné en Figure 2.33.

On dispose d'un canal de détection/datation de référence permettant de dater le départ de l'impulsion lumineuse et d'un canal de détection/datation de mesure permettant de dater le signal détecté par le système à étudier. La différence des dates $t_{ref.}$ et $t_{mes.}$ est alors analysée pour interpréter la sensibilité de la détection en fonction de différents paramètres et donc d'étudier la réponse du photodétecteur.

Des impulsions laser (longueur d'onde de 532 nm, cadence de 10 Hz et largeur à mi-hauteur de 50 ps), préalablement mesurées avec une caméra à balayage de fente, sont envoyées vers un banc optique à travers une fibre optique monomode. Ce banc de tests permet la variation du nombre de photons, la rotation de la polarisation et le changement de la position du faisceau lumineux sur le photodétecteur.

Le dispositif optique utilisé et les aberrations optiques sont tels que la tache laser a un diamètre de l'ordre de 12 μm sur le photodétecteur de retour. Le banc optique est placé dans une étuve permettant de chauffer ou de refroidir l'ensemble.

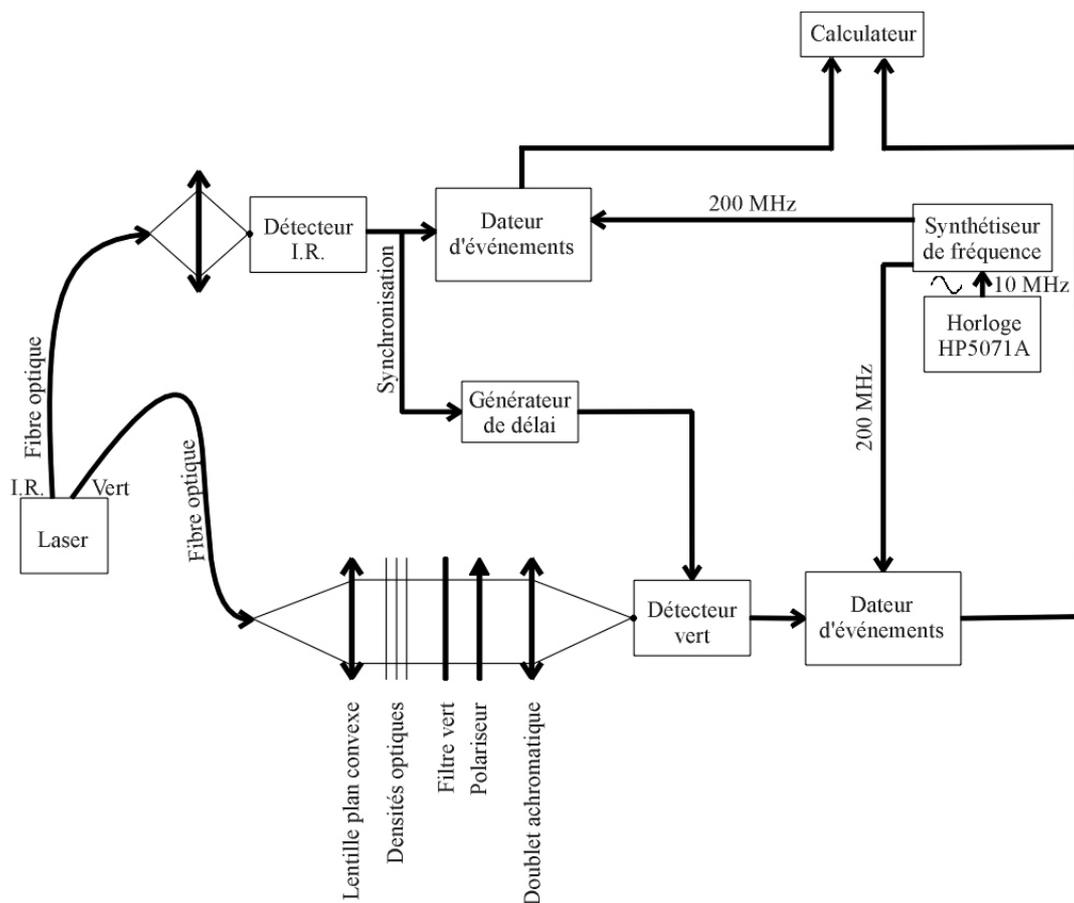


Figure 2.33 : Schéma du banc expérimental utilisé pour l'étude du photodétecteur de retour.

Le laser dispose d'un canal de sortie en vert et d'un canal de sortie en infrarouge, les impulsions dans les deux longueurs d'onde étant synchrones. Le signal infrarouge est envoyé à travers une fibre optique monomode vers le canal de détection/datation de référence. Celui-ci est constitué d'un photodétecteur linéaire infrarouge (InGaAs) et d'un dateur d'événements Thomson CSF Detexis. La précision de ce dateur est meilleure que 5 ps et sa linéarité inférieure à 2 ps [Samain, 1995]. Sur ce canal de référence, les conditions d'expérience sont constantes, notamment en ce qui concerne la forme de l'impulsion laser et la température. En effet, le détecteur infrarouge n'est pas forcément meilleur que celui à étudier, mais il se trouve dans des conditions stables, ses diverses sensibilités n'entrant donc pas en jeu. L'impulsion laser verte est envoyée vers le banc optique de tests.

Le signal de sortie du photodétecteur à étudier est envoyé vers un dateur d'événements identique au précédent. La base de temps est fournie par une horloge atomique au césium HP5071A (10 MHz) qui

alimente un synthétiseur de fréquence fournissant la référence d'horloge des systèmes de datation d'événements à 200 MHz.

Le résultat des systèmes de datation d'événements sont des dates ayant une origine arbitraire et dans notre cas, c'est la différence des dates qui importe. Les systèmes de datation sont reliés à un calculateur qui détermine en permanence la différence entre les dates de référence $t_{réf.}$ et de mesure $t_{mes.}$

Finalement, pour chaque impulsion laser on dispose des dates des événements de référence et de mesure ainsi que de la différence entre les deux. A partir de ces données, on est alors à même de calculer l'écart-type des différences ainsi que la stabilité et la sensibilité de cette différence en fonction des paramètres mentionnés plus haut.

La fibre optique monomode du canal vert joue le rôle de ligne à retard, de telle sorte qu'on soit capable de générer un créneau Geiger en avance sur l'arrivée des photons sur le photodétecteur ainsi présensibilisé. Ce créneau Geiger est fabriqué à l'aide d'un générateur de délai synchronisé sur le canal de détection infrarouge.

6.1.b Résultats expérimentaux

- Aucune sensibilité à la **polarisation** de la lumière n'a pu être observée.
- La sensibilité du temps de transit au **nombre de photons incidents** est indiquée dans la Figure 2.34. Cette sensibilité est de l'ordre de 20 ps par décade.

Le nombre moyen de photons incidents a été estimé par comptage du nombre d'événements détectés. Dans un premier temps, le nombre de photons arrivant à l'entrée du banc d'optique a été déterminé. Pour ce faire, le faisceau laser a été atténué d'un facteur connu, par l'insertion de densités optiques, de façon à obtenir à l'entrée du système de détection à tester un nombre moyen de photons proche de l'unité. Puis, le nombre moyen de photons a été déterminé par comptage du nombre d'événements détectés en supposant connu le rendement quantique du photodétecteur (0,2). On suppose également que la statistique de détection suit une loi de Poisson. La probabilité de détection d'au moins un photon est donnée par :

$$P = 1 - e^{-n\rho}$$

où n est le nombre moyen de photons et ρ le rendement quantique du photodétecteur. Cette probabilité est aussi égale au rapport du nombre d'événements détectés auquel on a enlevé les événements liés au bruit par le nombre d'événements envoyés. Ainsi, le nombre d'avalanches déclenchées est déduit de la probabilité de détection, d'où la connaissance du nombre le plus probable de photons. En connaissant le nombre de photons, on agit alors sur celui-ci en faisant varier les densités optiques placées dans le banc de tests afin d'étudier la réponse du photodétecteur.

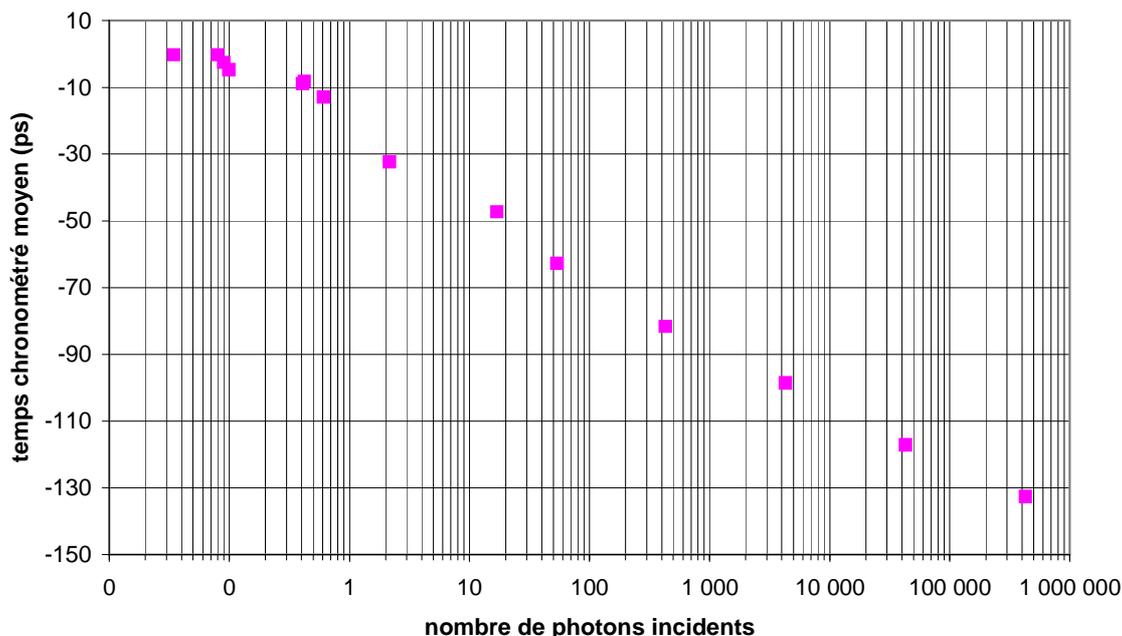


Figure 2.34 : Effet sur la chronométrie de la variation du nombre de photons incidents sur la surface sensible du photodétecteur. Les valeurs sont indiquées par rapport à une origine arbitraire.

Dans un mode de fonctionnement multi-photon comme en télémétrie laser, cette sensibilité dégrade la qualité globale des mesures. En effet, le nombre de photons de retour varie en raison des effets suivants : l'atmosphère, la distance du satellite, l'attitude du satellite, les variations d'aberration de vitesse, la qualité du pointage, les fluctuations du laser... Avec une dynamique du nombre de photons de 5 ordres de grandeur, la dérive temporelle de l'intervalle de temps mesuré est de l'ordre de 100 ps et la précision correspondante est de l'ordre de 30 ps. De plus, un problème d'inexactitude apparaît si le nombre de photons reçus pendant la phase d'étalonnage est différent de celui acquis durant le passage de satellite. Cette inexactitude peut atteindre, dans le pire des cas, 100 ps soit environ 15 mm. Cette valeur de 20 ps par décade est bien supérieure aux spécifications du constructeur qui l'indique inférieure à 10 ps par décade. Un nouveau réglage du système de compensation de la photodiode devrait résoudre ce problème.

- Une sensibilité à la position du point d'impact des photons sur la surface sensible de la photodiode (200 μm de diamètre) a également été mesurée. L'**effet centre-bord** est inférieur à 7 ps (voir Figure 2.35). Ce point était important à étudier puisque les photons de retour n'arrivent pas toujours au même endroit sur la surface sensible du photodétecteur de retour (écart de pointage, erreur relative entre les axes d'émission et de réception qui ont des effets en fonction de l'orientation de la tourelle, étalonnage réalisé avec un rétro-réflécteur laser dans une certaine position différente des retours au cours de la poursuite de satellites...). Les dissymétries dans cet effet peuvent être liées à une indétermination de la position du centre de la photodiode ou bien à une inhomogénéité de la qualité du silicium constituant la face sensible de la C-SPAD.

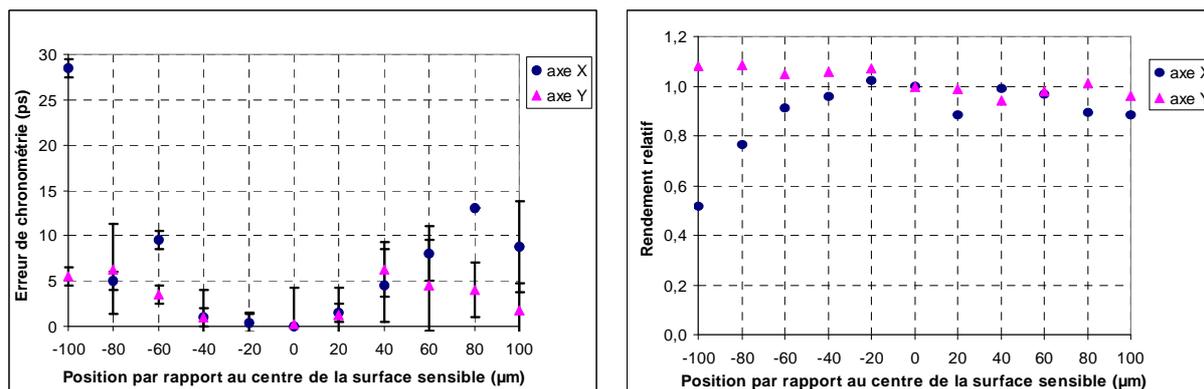


Figure 2.35 : Effet centre-bord mesuré sur la C-SPAD de la Station Laser Ultra Mobile selon deux axes perpendiculaires X et Y arbitraires. Le rendement relatif correspond au rapport du nombre de photons détectés sur le nombre de photons envoyés.

- Un écart de chronométrie est observé si le faisceau arrive en dehors de la partie active de la photodiode. Ceci est probablement corrélé à la sensibilité au nombre de photons, aux multiples réflexions dans l'environnement du photodétecteur et aux paires électron-trou générées ailleurs dans le silicium ayant donc un temps de propagation différent. Cet effet impose l'emploi d'un diaphragme limitant le champ de vue du détecteur de retour de la FTLRS, modification déjà exposée dans la quatrième partie de ce chapitre (foyer secondaire). On observe bien (voir Figure 2.36) un faible rendement relatif, mais comme on se trouve en mode multi-photon, la probabilité de détection est non négligeable.

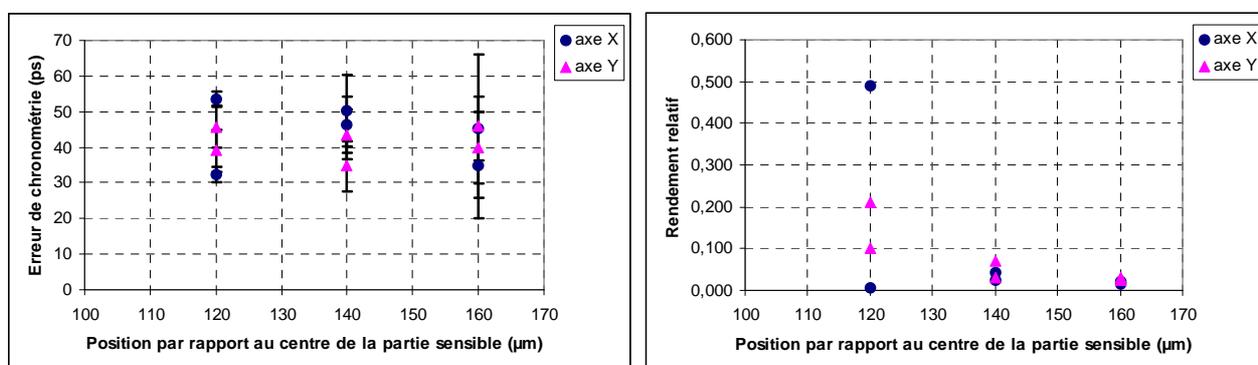


Figure 2.36 : Effet de photons arrivant à côté de la surface sensible du photodétecteur de retour.

- Aucune sensibilité à la **forme du signal Geiger** n'est décelée, tant que l'intervalle de temps entre l'impulsion Geiger et l'événement lumineux est supérieur à 100 ns (voir Figure 2.37). En effet, ces 100 ns sont nécessaires à la photodiode pour être sensible après le déclenchement du signal Geiger (la diode n'est pas sensible durant les 30 premières nanosecondes après le signal de présensibilisation et le temps d'établissement de la tension Geiger est de 70 ns). La stabilité du signal Geiger est essentielle en raison de la sensibilité du temps de transit à la tension appliquée à la photodiode.

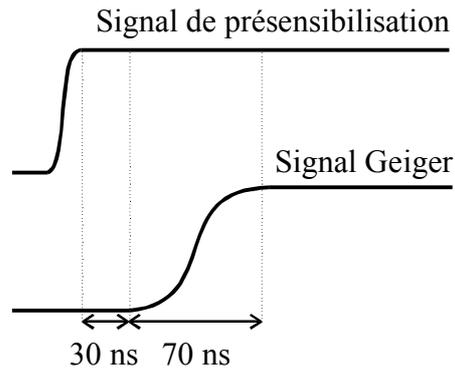


Figure 2.37 : Délai nécessaire à l'établissement du signal Geiger.

- La sensibilité en **température** a été évaluée à $3,5 \text{ ps}/^\circ\text{C}$ (voir Figure 2.38), ce qui correspond au résidu de l'asservissement en température du boîtier électronique du détecteur qui se trouve dans la tourelle. Le détecteur est quant à lui stabilisé au dixième de degré par l'utilisation de l'effet Peltier et de thermistances. Ce résultat est tout à fait satisfaisant étant données les faibles variations de température entre la poursuite d'un satellite et l'étalonnage. Les différences au cours d'une journée, d'une nuit ou entre les deux sont compensées par les mesures d'étalonnage elles-mêmes.

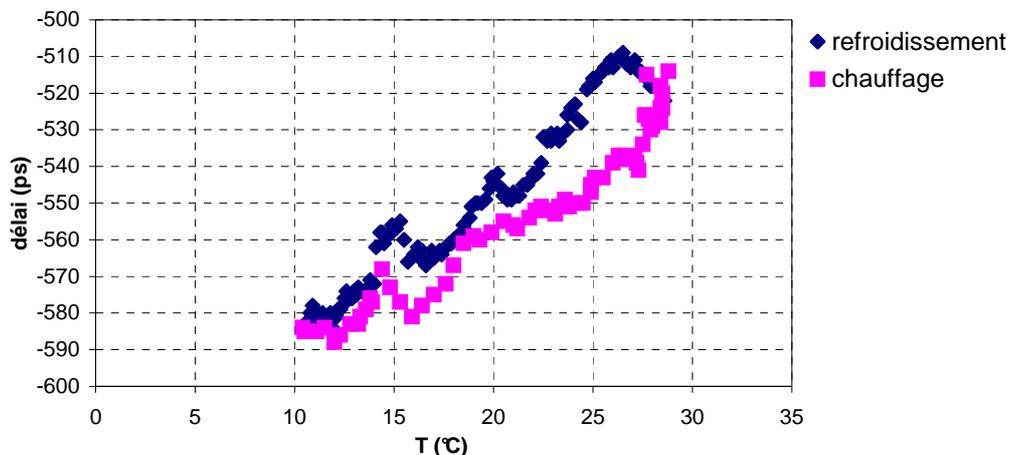


Figure 2.38 : Effet sur la chronométrie de la sensibilité thermique du détecteur de retour.

- La **stabilité temporelle**, déterminée par la racine carrée de la variance temporelle, présente un plancher à $1,2 \text{ ps}$ sur 200 s d'intégration avec un intervalle moyen entre deux mesures de $0,2 \text{ s}$. L'expérience a été menée avec une probabilité de détection de $0,7$ photon par impulsion laser. Vis-à-vis du photodétecteur, il est donc légitime de construire les points normaux sur une durée inférieure à 200 s dans le sens où sur cette durée d'intégration, on se situe dans un régime de bruit blanc. Par contre, au-delà de ces 200 s , on enlève une partie de l'information contenue dans le signal de détection de retour.

- La **précision** de la C-SPAD est de l'ordre de 25 ps dans le mode de détection simple photon et se situe au niveau de 12 ps en mode de détection multi-photon.

Toutes ces valeurs seront à confirmer avec des impulsions de 35 ps de largeur au lieu de 50 ps puisque le système de compensation a été optimisé pour des impulsions plus courtes que celles employées pour faire les mesures. Les écarts aux spécifications devraient être plus faibles puisqu'ils sont peut-être liés à la forme temporelle du faisceau laser lui-même ; dans ce cas le réglage de la C-SPAD devra être refait avec le laser de la station mobile dans sa configuration finale.

6.2. Chronométrie

Le chronomètre utilisé jusqu'alors est un Stanford SR620. C'est un instrument permettant des mesures de signaux discrets, d'intervalles de temps, de temps de montée, de largeur d'impulsion, de fréquence et de comptage d'événements. Dans le cas de la FTLRS, il est uniquement utilisé dans le mode intervallométrique. L'instrument a une entrée A qui reçoit l'impulsion de départ et une entrée B qui reçoit l'impulsion d'arrêt. Une fois que les deux impulsions ont été reçues, le compteur délivre l'intervalle de temps entre ces impulsions. La base de temps interne au chronomètre est un quartz TCXO qui peut être asservi sur une fréquence externe (césium, horloge au rubidium asservie sur GPS). La mesure de l'intervalle de temps entre A et B est la somme d'une datation grossière et d'une datation fine. La première est déterminée par comptage des passages au zéro du signal d'horloge entre A et B. La seconde est réalisée à partir de la mesure de tension aux bornes d'une capacité chargée à courant constant pendant la période de temps séparant l'arrivée de l'événement A du passage au zéro consécutif du signal d'horloge. Le processus de chronométrie a lieu pendant plusieurs microsecondes.

Afin de caractériser ce chronomètre, l'expérience décrite ci-après a été menée.

6.2.a Méthode d'estimation

La linéarité à long terme (période supérieure à celle de l'horloge) a été mesurée. Les caractéristiques liées au déclenchement des données et celles inhérentes à la linéarité à court terme (période de l'horloge de référence) ont déjà été étudiées par E. Samain [Samain, 1995]. La conséquence de ces deux problèmes est la dégradation de la précision qui se situe au niveau de 30 ps rms. Seule la linéarité à long terme, concernant les intervalles de temps compris entre 100 ns et 1 s, a donc été étudiée. Nous avons construit une expérience capable de générer des impulsions électriques ayant un intervalle de temps connu (voir Figure 2.39). Ceci est réalisé en déclenchant ces impulsions sur les passages au zéro d'un signal sinusoïdal de référence à 10 MHz fourni par une horloge atomique au césium ayant une exactitude en fréquence meilleure que 10^{-12} (HP5071A). Les passages au zéro sont sélectionnés par comptage d'un nombre entier de périodes. Le dispositif permet de générer des intervalles temporels compris entre 0 et quelques secondes par pas de 100 ns. L'exactitude évaluée du système est meilleure que 5 ps. Afin d'éviter les sources de couplage, le signal d'horloge du chronomètre est extrait d'un quartz à 10 MHz (OCXO du LCEP¹) dont l'exactitude en fréquence est de 10^{-8} et la stabilité en fréquence est de $5 \cdot 10^{-12}$ sur 10 s. La différence de fréquence entre ces deux signaux a été mesurée.

¹ LCEP : Laboratoire chronométrique et de piezoélectricité.

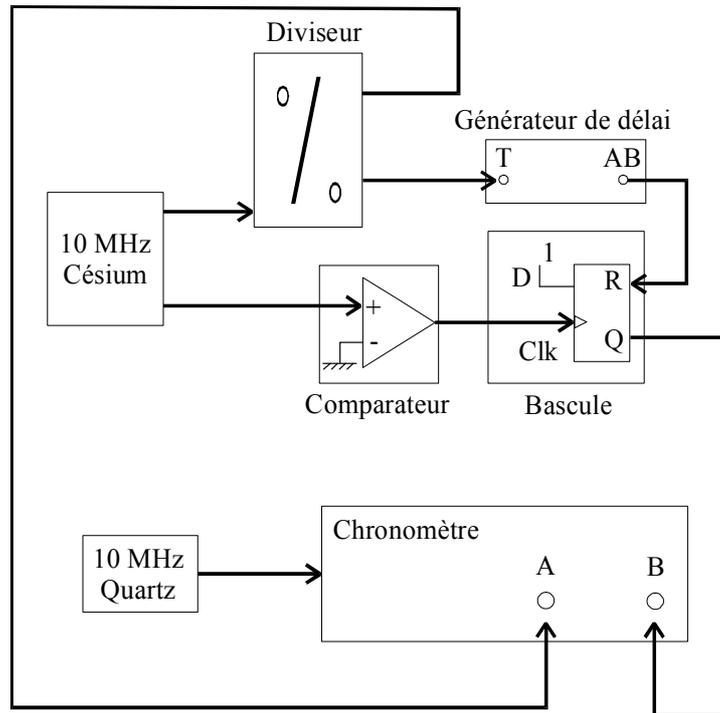


Figure 2.39 : Schéma du banc expérimental utilisé pour l'étude de la linéarité du chronomètre.

6.2.b Résultats expérimentaux

La Figure 2.40 décrit l'erreur de linéarité de l'intervallomètre. L'abscisse représente les intervalles de temps fabriqués et donc supposés exacts entre les impulsions A et B. L'ordonnée correspond à la différence entre ces intervalles de temps et la réponse de l'intervallomètre. Les résultats sont corrigés de l'écart en fréquence entre le quartz et le césium.

L'écart-type à délai constant sur les durées caractéristiques de l'expérience est de 10 ps et l'écart-type à des délais différents est de 11 ps. La non linéarité du système de génération de délais (différence entre le délai imposé et le délai effectivement généré) est négligeable (< 5 ps).

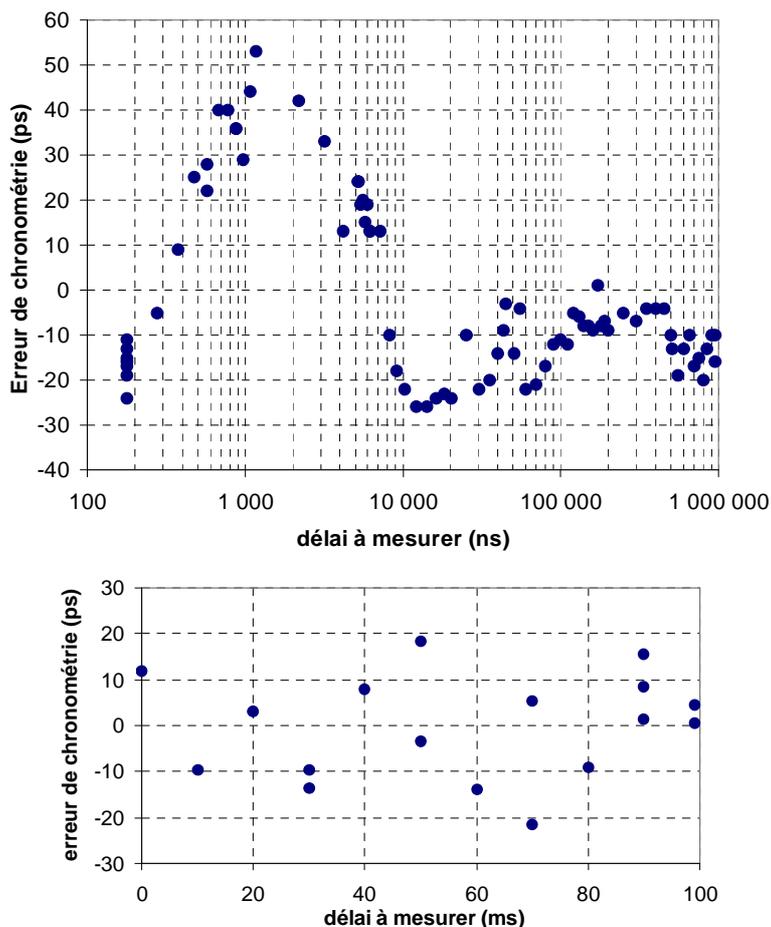


Figure 2.40 : Ecart à la linéarité de la chronométrie en fonction du délai à mesurer.

On observe une erreur de linéarité d'amplitude d'environ 70 ps, défaut seulement appréciable pour des intervalles de temps compris entre 200 ns et 10 μ s. Cet effet provient probablement de la perturbation électrique induite par la mesure du signal de départ sur le canal recevant le signal d'arrêt (couplage entre les deux entrées A et B qui ne sont pas parfaitement isolées) étant donnée la durée du processus de chronométrie.

Cette non linéarité peut dégrader l'exactitude des mesures de distance de la FTLRS si la procédure d'étalonnage est réalisée avec des cibles situées à une distance correspondant à un intervalle de temps compris entre 200 ns et 10 μ s, comme c'était le cas lors de la campagne en Corse. Cet effet peut être ignoré si l'intervalle de temps utilisé pour l'étalonnage est supérieur à 10 μ s.

Des mesures seront réalisées avec le chronomètre Stanford pour des intervalles de temps inférieurs à 200 ns afin de vérifier qu'il n'y a pas de problème pour les courtes distances d'étalonnage et donc avec le nouveau type d'étalonnage apporté à la station mobile (avec le coin de cube placé à la sortie du télescope, la distance d'étalonnage correspond à un intervalle de temps inférieur à 100 ns).

6.3. Laser

Des mesures de la sensibilité selon l'orientation du faisceau, de l'évolution de la largeur des impulsions et du niveau énergétique sont programmées. Elles permettront de caractériser complètement le laser de la FTLRS, ce qui n'a pas été réalisé jusqu'à présent. On en déduira alors des informations complémentaires sur le bilan d'erreur et l'exactitude des mesures de la station.

Les mesures de largeur d'impulsions en fonction de différents paramètres (température de l'eau de régulation, réglage de l'acousto-optique...) seront réalisées avec une caméra à balayage de fente. Le problème qui se posera alors dans cette expérience sera de pouvoir retarder l'impulsion laser sans la déformer car il faut synchroniser la caméra à balayage de fente suffisamment longtemps avant l'arrivée de l'impulsion. D'autre part, on ne disposera que de l'information temporelle puisque la lumière passe dans une fibre optique. On aura cependant accès à l'énergie, à la largeur, à l'amplitude et à la forme de l'impulsion ainsi qu'à la stabilité de la largeur, ce qui est amplement suffisant pour faire un diagnostic. Ainsi, on pourra disposer d'informations supplémentaires sur les sources d'instabilités, de dérèglages et sur leurs effets. Par exemple, on sait déjà que des instabilités ont lieu tant qu'il règne un gradient de température dans les barreaux de Nd:YAG [Samain, 2000].

Pour ce qui est de l'orientation du faisceau laser, on s'est aperçu qu'une déviation de l'ordre de 10^{-3} rad pouvait se produire au niveau de la cavité pilote en l'espace d'une nuit. Il a alors fallu déplacer le détecteur de départ de 100 μm pour retrouver un signal lumineux¹. La stabilité en orientation du faisceau laser sera donc mesurée avec une optique et une caméra vidéo, étude qui sera également menée en fonction de la température.

6.4. Bilan d'erreur global

Après cette série de tests, on peut d'ores et déjà avoir une première estimation des performances de la Station Laser Ultra Mobile dans sa nouvelle configuration.

La **stabilité temporelle** de la FTLRS est ainsi meilleure que **2 ps** sur 200 s d'intégration, avec un intervalle moyen entre deux mesures de 0,2 s. Cette valeur a été obtenue à partir de la zone en bruit blanc des courbes de stabilité de la C-SPAD et du chronomètre, c'est-à-dire les deux plus grandes sources d'erreurs instrumentales. Cette partie de la courbe correspond à celle où les différents intervalles de temps mesurés sont indépendants les uns des autres. A partir de là, on sait que la stabilité temporelle de la station ne pourra pas être meilleure que ces 2 ps.

La précision des mesures de la station mobile a été déterminée compte tenu de celle obtenue pour la C-SPAD lors des tests explicités précédemment, en ôtant l'imprécision liée au système de datation utilisé pour les expériences et en ajoutant celle liée au chronomètre Stanford SR620. On obtient alors une **précision instrumentale** de l'ordre de **35 ps** (soit environ 5 mm). Cette valeur représente effectivement la précision de la station puisque la précision du photodétecteur de retour estimée à partir des expériences décrites précédemment tient compte non seulement de celle de la C-SPAD en elle-même, mais aussi des fluctuations du laser, de la précision du photodétecteur de départ et de celle du système de datation. En effet, notre expérience nous a amenés à construire l'équivalent de la chaîne de mesures d'une station de télémétrie laser sur table (laser, chaîne de chronométrie et photodétecteurs).

Aujourd'hui, il n'est malheureusement pas encore possible d'estimer directement l'**exactitude** de la station mobile après toutes les modifications apportées. En effet, beaucoup de mesures, parfois quasiment impossible à réaliser, sont encore nécessaires avant de pouvoir conclure quant à la valeur de l'exactitude finale de l'instrument.

¹ Cet effet a été observé avant la modification des montures opto-mécaniques du banc laser mentionnée précédemment.

Dans un premier temps, des mesures de stabilité doivent être menées sur cibles fixes avec traversée de l'atmosphère. La stabilité ainsi obtenue tiendra compte de l'ensemble des bruits observationnels. On pourra alors en déduire le bruit restant pour une certaine durée d'intégration pour le calcul des points normaux. Néanmoins, une fois encore, cette valeur de stabilité n'inclura que les bruits blancs.

Dans une seconde étape, il faudra ajouter toutes les autres sources de bruit comprises dans les mesures de télémétrie laser (cités a priori par ordre décroissant d'effet sur les observations) :

- l'écart de réponse du photodétecteur entre l'étalonnage et la poursuite de satellite. L'évaluation de cet effet doit à la fois considérer les différences dues à l'angle d'incidence (effet centre-bord) et les variations du niveau énergétique de retour. Ce point tient également compte des problèmes liés au fait que les mesures d'étalonnage sont réalisées à une orientation de la tourelle donnée, contrairement à la poursuite de satellites,
- l'amplification des effets de la signature de satellite par le dispositif de compensation de la C-SPAD (physique de la photodiode). Ce point est à prendre très au sérieux mais il est extrêmement difficile à estimer puisqu'il faudrait alors pouvoir disposer de maquettes de satellites pour faire une expérience valable et des mesures représentatives de cet effet,
- l'exactitude de la détermination du chemin optique entre la cible d'étalonnage et la croisée des axes du télescope (~ 1 mm),
- les effets de la polarisation de la lumière qui dans le cas de la FTLRS vont affecter essentiellement le bilan de liaison (rétroreflecteurs laser non traités sur LAGEOS),
- les différences de perturbation de la C-SPAD au passage de l'impulsion laser de départ entre les passages de satellite et les mesures d'étalonnage (différence du taux de paires électron-trou créées) en dépit de l'obturateur électro-optique,
- les différences de région laser entre les poursuites de satellites et l'étalonnage : étant donné que les mesures d'étalonnage sont réalisées après les passages de satellite, on peut supposer que le faisceau laser peut différer entre les deux, notamment en raison d'effets thermiques même si l'amplificateur double passage est en fonctionnement dans les deux cas justement pour des raisons de stabilité thermique¹,
- les déformations spatiales et temporelles des impulsions laser : par exemple, la zone spatiale du faisceau laser considérée est différente entre les passages de satellites et les mesures d'étalonnage. Pour estimer cet effet il faudrait réaliser des mesures afin d'échantillonner spatialement et temporellement la distribution énergétique du faisceau laser,
- les différences du créneau Geiger de sensibilisation de la photodiode entre l'étalonnage et l'observation de satellite. Cependant, cet effet est complètement négligeable dès lors que les délais de présensibilisation (100 ns) sont respectés (voir partie précédente). Néanmoins, des effets probablement faibles sur le signal Geiger lui-même peuvent se produire puisque la situation est différente entre les mesures sur satellite et l'étalonnage. Le signal Geiger est synchrone avec les impulsions laser uniquement pour les mesures d'étalonnage tandis que l'avance de ce signal par rapport à l'arrivée des photons est différente, ce qui peut avoir des effets sur la chronométrie selon la stabilité du signal Geiger entre les mesures d'étalonnage ou de poursuite de satellite,
- l'incertitude liée à la différence de chronométrie entre les poursuites de satellites et les mesure d'étalonnage en raison de la qualité intrinsèque du chronomètre. Cependant, cet effet peut être complètement négligé dans le cas de la FTLRS (voir partie précédente),
- l'exactitude en fréquence de l'horloge ($< 10^{-12}$),
- l'effet dispersif de l'atmosphère changeant la longueur d'onde et modifiant par la même la profondeur de pénétration dans la partie sensible de la photodiode qui peut induire des variations de

¹ Pour les mesures d'étalonnage, il y a juste un décalage temporel de la fluorescence des flashes de l'amplificateur pour que le faisceau laser ne soit pas amplifié.

temps de transit dans le photodétecteur. Cet effet est cependant négligeable si les impulsions ne sont pas trop courtes comme dans le cas de la station mobile.

De plus, il faut prendre en considération des aspects non directement liés à l'instrumentation en tant que telle, mais valables pour n'importe quelle station de télémétrie laser, comme :

- l'erreur sur la correction des effets de propagation du faisceau laser dans l'atmosphère (< 10 mm),
- les erreurs de modélisation de la signature des satellites,
- l'exactitude de la détermination du point de référence des mesures, à savoir le positionnement de la croisée des axes du télescope par rapport au reste de l'instrumentation.

Pour que le bilan d'erreur soit complet, il faudrait également prendre en compte les éventuelles erreurs de logiciels parfois difficiles à détecter et qui peuvent se découvrir après de nombreuses années d'utilisation. A un autre niveau, des effets liés à la composante humaine de chaque observateur doivent être aussi considérés. En effet, les mesures laser n'étant pas entièrement automatisées, elles ne sont donc pas totalement impersonnelles, notamment en raison des réglages divers à effectuer au cours des observations (densités optiques dans le faisceau laser, divergence, niveau énergétique employé au cours de l'étalonnage...). On peut aussi mentionner des effets liés à la non uniformité de la tache laser et aux réglages optiques, comme celui du coudé, qui génèrent des variations de trajet du faisceau laser dans la station selon l'orientation du télescope.

Finalement, nous aurons accès à une estimation de l'exactitude des mesures étant donné que la contribution à l'erreur globale de certains des points mentionnés ci-dessus est complètement inaccessible à l'expérience. D'autre part, on n'est pas à l'abri d'avoir oublié un paramètre. Enfin, le nombre d'effets à considérer sera d'autant plus grand que le niveau d'exactitude recherché s'approchera du millimètre.

Cependant, à l'issue de cette étude, nous sommes à même de dresser un **bilan d'erreur global** des observations de la FTLRS dans sa nouvelle configuration. En effet, les mesures présentées précédemment ainsi que nos connaissances de la station laser satellites fixe du plateau de Calern, dont la conception et le fonctionnement sont très proches de ceux de la station mobile, nous permettent d'évaluer la part de chaque source d'inexactitude (voir Tableau 2.5).

Ainsi, il apparaît clairement que les résultats sont tout à fait compatibles avec les objectifs recherchés pour les nouvelles performances de la FTLRS puisque le bilan actuel en laboratoire conduit à une exactitude des mesures de la station mobile inférieure à 12 mm. Cette valeur laisse présager qu'une exactitude finale de 1 cm est un objectif bien réaliste, même si le verdict définitif ne pourra être établi qu'à la suite des prochaines mesures de la FTLRS sur satellites.

Tableau 2.5 : Bilan d'erreur provisoire pour la FTLRS.

Source d'erreur	Evaluation de son effet sur la mesure de distance (mm)
Ecart de la réponse de la C-SPAD entre la poursuite de satellite et l'étalonnage	5
Polarisation de la lumière	≤ 1
Erreurs de modélisation :	
Atmosphère	5
Signature de satellite (pour JASON-1)	3
Chronométrie	3
Autre (estimation d'après la station laser satellites fixe du plateau de Calern)	≤ 5
Bilan actuel en laboratoire	≤ 12

7. Conclusion

La majorité des modifications techniques apportées à la FTLRS dans le but d'augmenter la sensibilité de l'instrument (capacité de télémétrer les satellites LAGEOS), d'atteindre le niveau d'exactitude de 1 cm (étalonnage des altimètres de JASON-1 et ENVISAT, transfert de temps) et d'avoir une meilleure stabilité de la qualité des données ont été réalisées.

Les dernières améliorations concernent le remplacement de l'oscillateur rubidium asservi sur GPS. Mais ceci n'est pas urgent à très court terme puisque lors de la phase de validation des nouvelles performances de la FTLRS au plateau de Calern, un service temps-fréquence distribuera un signal d'horloge de très bonne qualité.

A plus long terme, il est envisagé d'installer des dateurs d'événements à la place des chronomètres afin de disposer d'une chaîne de chronométrie plus précise et plus exacte. La plupart des difficultés survenues dans la mise en place de ces améliorations est due à l'extraordinaire compacité de l'ensemble aussi bien au niveau du laser, du télescope que de la monture et replace bien ce projet dans le contexte d'un réel défi technologique. Les premiers résultats semblent satisfaisants et les différents objectifs semblent avoir été atteints à la vue des premiers tests menés sur le chronomètre et sur les caractéristiques du photodétecteur de retour.

En ce qui concerne le chronomètre, des variations de chronométrie ont été mises en évidence au cours des premières 10 μ s dues à son principe interne de mesure. Il reste à vérifier que ces variations ne sont pas critiques pour les distances d'étalonnage inférieures à 50 m, ce qui est désormais le cas pour la FTLRS depuis l'installation du nouveau système d'étalonnage avec le coin de cube rétro-réflécteur placé juste devant le télescope. Cela peut néanmoins expliquer les instabilités de qualité des données apparues au cours de la campagne en Corse puisque la cible d'étalonnage était située à environ 300 m de la station.

L'étude des fluctuations du temps de réaction du photodétecteur de retour en fonction de différents paramètres est très intéressante pour avoir une meilleure connaissance des biais induits par cette partie de l'instrumentation de la station mobile. Tout d'abord, il est apparu que 100 ns sont nécessaires entre le signal de présensibilisation et l'arrivée effective des photons pour que la réponse du photodétecteur

ne soit pas biaisée. L'effet centre-bord, qui a été évalué à moins de 10 ps, peut être négligé. La dérive d'environ 20 ps par décade du nombre de photons semble trop importante par rapport à ce qu'on pouvait attendre du système de compensation de la C-SPAD. Cette valeur sera donc vérifiée avec un laser ayant des impulsions de 35 ps de large pour lequel la C-SPAD est normalement optimisée, puis le photodétecteur sera réglé pour le laser de la FTLRS. Une variation liée à la température environnementale de 3,5 ps/°C a été mise en évidence. Elle correspond au résidu de la régulation thermique de la photodiode. Mais cela ne dégrade pas la qualité des données puisque les variations de température sont faibles entre la poursuite de satellite et l'étalonnage, qui doit compenser ces effets. Les tests d'exactitude concernant les caractéristiques du laser (notamment largeur des impulsions et stabilité, orientation du faisceau) et la régulation thermique du laser seront réalisés prochainement.

Outre l'aspect instrumental qui a été étudié en profondeur au cours de ce chapitre afin d'analyser les différentes sources d'erreur, l'étape suivante dans l'évaluation de la qualité des mesures se fait à partir de l'analyse des données laser. Ainsi, le troisième chapitre de ce document présente une méthode de contrôle de la stabilité des observations réalisable à partir de l'analyse des données. Celle-ci s'appuie sur les résultats d'une expérience de co-localisation dont les intérêts ont été mentionnés dans le premier chapitre. Une interprétation géodynamique des résultats obtenus est également présentée.

Chapitre 3

ANALYSE DE DONNEES

1. Introduction

Quand un grand nombre de données est disponible sur des systèmes complexes, comme en géodésie spatiale, des méthodes d'analyse adaptées sont nécessaires pour déterminer les effets physiques recherchés. Les erreurs sur les quantités mesurées doivent être déterminées à partir de la connaissance des performances connues de l'appareillage de mesure. C'est pourquoi tous les points indiqués dans le précédent chapitre doivent être présents à l'esprit dans toute analyse de données laser, notamment pour interpréter la dispersion des mesures.

Pour chaque jeu de paramètres à déterminer, une loi théorique doit être associée au résultat attendu. Le choix des paramètres inconnus à résoudre est délicat : s'ils sont trop nombreux, l'exactitude est perdue et l'analyse des données devient compliquée sans réelle nécessité ; d'un autre côté, si des paramètres importants sont supposés connus et exclus du jeu de paramètres à déterminer, leur erreur peut affecter de manière inconnue le résultat. L'incertitude du modèle théorique doit également être prise en compte.

Au cours du traitement des données, il faut donc s'interroger sur les corrections relatives aux sources de biais et s'assurer d'éliminer toutes les sources d'erreurs de traitement des données, d'où la nécessité d'une vérification du système de mesures et du procédé de traitement (méthode, logiciel...) pour éviter de rajouter des erreurs évitables.

Il est important de déterminer quelle part d'incertitude est introduite par la procédure d'analyse. A ce niveau, un dialogue entre les stations et les centres d'analyse est nécessaire afin d'identifier les hypothèses faites et induisant parfois quelques problèmes évidents qui pourraient malgré tout passer inaperçus. Il est essentiel que chaque station soit capable de décrire en détails les procédures d'acquisition des données, d'étalonnage et de création des points normaux afin que les analystes aient une bonne compréhension du contenu réel des observations et donc de la physique de la mesure. Les centres d'analyse, quant à eux, doivent indiquer comment les mesures sont traitées et ce, à partir du moment où ils les récupèrent dans les bases de données jusqu'aux résultats scientifiques. Les résultats des contrôles de la qualité des données utilisées par les centres d'analyse doivent être transférés rapidement aux stations laser, et si possible d'une manière telle que la source de biais soit clairement identifiable par les équipes techniques des stations. A ce niveau, le problème du stockage, de la disponibilité et de la diffusion de telles informations se pose.

Afin d'assurer la qualité des centres d'analyse, un certain nombre de questions, qui peuvent sembler banales, doivent trouver des réponses précises. En voici quelques-unes :

- Quels sont les exemples courants de problèmes dans les données ?
- Quelles sont les différentes sortes de techniques d'analyse employées ? Quelles sont leurs forces et leurs faiblesses dans la détermination des problèmes et de la qualité des données ? Quels sont les facteurs limitants dans la détection des erreurs ?
- Quelles sont les cibles les meilleures pour déterminer les performances d'un système et quelles sont les pires ? Pourquoi ? Faut-il en considérer et/ou en observer davantage ?
- Le système de pondération des données est-il basé sur des performances passées des stations ? Et si oui, quelles seraient les conséquences si l'une des stations dont les mesures sont fortement pondérées commençait à présenter un biais observationnel important ?

- Quelles sont les exigences d'exactitude des points normaux pour les recherches scientifiques ? Pour un satellite donné, ces besoins sont-ils différents pour une détermination rapide d'orbite précise (POD : *Precise Orbit Determination*) par rapport à ceux requis pour une orbitographie en temps différé ou un positionnement de station ?
- Quels autres sous-produits de la détermination d'orbite peuvent être développés pour aider à caractériser la source d'un biais apparent en distance ou en temps ? Que peut-on faire pour minimiser la possibilité que l'analyse elle-même soit une source du problème (par exemple coordonnées de station, longueur d'onde du laser, correction du centre de masse...)?
- Quel est le schéma d'analyse utilisé ? Comment est-il cohérent au cours du temps, par rapport aux différentes cibles ?
- Quels sont les objectifs (recherche de la qualité des stations, positionnement, système de référence, meilleure description des phénomènes physiques...)? En effet, une définition claire des produits d'analyse est importante et permet à la fois une liberté et une progression dans l'analyse des données.
- Quelles sont les données standard d'analyse utilisées (identification et caractéristiques des stations, constantes et modèles physiques) ?
- Les résultats obtenus sont-ils en accord avec la qualité estimée des données ?
- Quelle devrait être la part des données LLR (positionnement) ?
- Au niveau des stations, peut-on voir des problèmes dans les données après les mesures d'étalonnage et la création des points normaux ?

Les bénéfices attendus des réponses aux questions précédentes sont la détection d'erreurs dans l'analyse, la définition des produits et l'amélioration globale des stations de la communauté laser. Ainsi, les besoins et les limitations peuvent être mis en évidence.

Les premiers estimateurs utilisés en contrôle qualité sont les biais en temps et en distance. Il y a également l'écart-type des orbites, les résidus des points normaux et leur précision, mais on peut aussi utiliser d'autres estimateurs.

Au niveau des stations, le prétraitement des données doit être contrôlé avant l'envoi aux bases de données internationales. On peut notamment analyser l'histogramme des résidus (distance observée moins distance calculée à partir d'un modèle d'orbite et de coordonnées de stations) ainsi que l'écart-type des mesures, passage par passage, avec éventuellement un retraitement. Par exemple dans le cas de T/P, un écart type de l'ordre de 2-2,5 cm sur les mesures est un indicateur de la disposition en forme de couronne des rétroreflecteurs laser. Si on obtient un écart-type de l'ordre du centimètre, une deuxième itération de traitement est nécessaire puisque cette dispersion des résidus ne correspond pas à la signature du satellite attendue.

Il faudrait pouvoir tester en temps réel et automatiquement tous les paramètres qui influent sur la qualité des données, surtout quand des changements sont effectués dans les parties logicielles ou instrumentales.

Au niveau de chaque centre d'analyse, il faut d'abord contrôler que les données ont été correctement enregistrées durant les opérations de poursuite, mises dans le bon format et que l'intégrité des données a bien été vérifiée dans le logiciel de traitement. Il faut également s'assurer que les données ont été convenablement traitées en validant par des calculs manuels et que toutes les conditions spéciales ont été correctement manipulées. Il est aussi nécessaire de vérifier que les points normaux ainsi que tous les paramètres incorporés dans le format des points normaux sont plausibles. De plus, il faudrait considérer à la fois les points normaux qui sont stockés et disponibles dans les bases de données, ainsi que les données brutes qui contiennent d'autres informations significatives

dans une procédure d'étude et de caractérisation de la qualité des observations laser. Des critères de performances attendues sont également à établir.

Dans toute l'étude présentée dans ce chapitre, nous avons tenté d'optimiser la prise en compte de la physique de la mesure laser, sans introduire de biais dans les différents niveaux de l'analyse.

2. Expérience de co-localisation

Depuis plus de 20 ans, le site géodynamique français du plateau de Calern a participé à la poursuite de nombreux satellites géodynamiques, géodésiques et océanographiques. Les deux stations laser satellites fixe et laser Lune sont les systèmes principaux, mais des efforts particuliers ont été réalisés ces dernières années afin de combiner différentes techniques de géodésie spatiale comme GPS et DORIS ainsi que des mesures gravimétriques acquises plus récemment.

De manière à diminuer les biais des systèmes laser, l'équipement instrumental et les analyses scientifiques et techniques de données sont aussi en amélioration constante à l'OCA. La détection des biais instrumentaux est essentielle afin d'aboutir à un système de référence absolu le plus stable possible, permettant notamment le contrôle et donc la modélisation des mouvements verticaux très délicats à mettre en évidence.

Les observations sur satellites avec la FTLRS, dans sa nouvelle configuration, n'étant pas encore disponibles, une technique d'analyse, permettant d'évaluer la qualité des mesures laser, a été développée indépendamment de la station laser considérée (station mobile, fixe, laser Lune). Ceci est réalisé dans le but de pouvoir qualifier ultérieurement la FTLRS sur le terrain.

C'est dans ce contexte qu'une expérience de co-localisation est menée depuis 1997 entre les stations laser satellites fixe et laser Lune du plateau de Calern, distantes d'une vingtaine de mètres. En particulier, il se trouve que les caractéristiques de la station laser fixe sont très proches de celles nouvellement apportées à la FTLRS dans le cadre de mes travaux de thèse (voir Chapitre 2). Ce type d'analyse croisée fournit des informations sur la qualité objective des stations et leur positionnement, tout en permettant une détection d'un biais instrumental et d'un signal saisonnier avec son interprétation géophysique. Cette expérience de co-localisation, basée sur les observations conjointes des satellites LAGEOS -1 et -2, sera étendue dès que possible aux mesures de la FTLRS.

Cette étude est menée sur les observations des satellites LAGEOS car, de par leur altitude moyenne de 6 000 km, ils constituent des cibles stables (champ de gravité peu perturbé, satellite massif et peu sensible aux forces non gravitationnelles) couramment employées pour le positionnement de précision. De plus, ce sont les plus basses cibles accessibles à la station laser Lune. Ils sont également couramment observés par la station laser satellites fixe. Ce type de campagne d'observations et d'analyse scientifique cadre bien avec l'objectif de maintenir le plateau de Calern en tant qu'observatoire géodésique fondamental. Cette expérience permet également de considérer le nouveau rôle de la station laser Lune qui observe continûment depuis avril 1997 les satellites les plus élevés (LAGEOS, ETALON, GPS et GLONASS).

Dans une expérience de co-localisation deux ou plusieurs systèmes proches l'un de l'autre poursuivent simultanément une série de passages de satellites. Une exactitude de niveau millimétrique des excentricités entre les points du système de référence est permise par des techniques de géodésie classique qui peuvent avoir cette qualité sur de courtes distances. La proximité des différents systèmes permet aussi d'avoir un même effet de propagation atmosphérique des faisceaux laser entre les stations très proches et le satellite. L'utilisation de différentes techniques co-localisées est un facteur clé pour améliorer l'exactitude absolue des produits géodésiques, à savoir le positionnement et la détermination d'orbite, à la fois à un niveau global et séparément pour chaque technique et instrument. L'opportunité de disposer de trois stations laser indépendantes localisées sur le même site sera unique pour la détection d'erreurs et de biais spécifiques à chaque station dans les mesures laser. Tout ceci contribue également à l'objectif de l'ILRS, à savoir le contrôle de l'exactitude des mesures, la stabilité des biais et une meilleure efficacité des stations.

Un des objectifs principaux de notre expérience de co-localisation est de décorrélérer les erreurs systématiques provenant de différentes sources : l'instrumentation, l'orbitographie (y compris les erreurs géographiquement corrélées d'origine gravitationnelle), les coordonnées de stations (l'erreur sur la composante verticale est particulièrement importante pour l'étalonnage des altimètres) et les corrections géophysiques. On peut aussi comparer les positions relatives des stations très proches l'une de l'autre dont on connaît par ailleurs la différence des coordonnées géodésiques. On peut encore comparer les variations temporelles de leur position, de leur biais et de leurs corrections de toute nature qu'il faut appliquer aux mesures dans les analyses (temps de propagation dans la troposphère, marées, effets de charge océanique et atmosphérique). Enfin, cela doit permettre de lier les repères de références terrestre et lunaire, au moins en un point.

Outre les nombreux objectifs mentionnés précédemment, cette campagne a été l'occasion de mettre au point un ensemble de calculs et de logiciels afin de déterminer la stabilité instrumentale de chaque télémètre laser ainsi que l'évolution temporelle du positionnement (périodes annuelles et saisonnières). Ainsi, on dispose dorénavant d'une bonne expérience permettant de déterminer la qualité des observations de la FTLRS dès qu'elle observera les satellites.

La méthode d'analyse employée et les principaux résultats obtenus, tant au niveau local que global, sont présentés dans la suite de ce chapitre.

3. Méthode

L'analyse des données comporte très schématiquement trois phases.

Dans un premier temps, des orbites dynamiques sont restituées, à partir desquelles les résidus laser et une estimation des biais annuels moyens sont déterminés pour différentes stations.

Dans un deuxième temps, un ajustement des coordonnées des stations est réalisé.

Finalement, la troisième phase consiste à chercher une modélisation des fluctuations d'altitude observées, en prenant en compte des effets jusque-là négligés. Ces mouvements verticaux des stations sont ainsi analysés, à la fois au niveau local (par comparaison aux mesures d'un récepteur GPS permanent et à celles de campagnes menées avec un gravimètre absolu transportable), puis au niveau mondial.

3.1. Hypothèses de calcul

Trois hypothèses essentielles, développées ci-après, sont à la base des calculs présentés dans notre analyse :

- seules les observations des satellites LAGEOS-1 et-2 sont prises en compte,
- le réseau laser considéré est suffisant et bien distribué pour poursuivre les satellites avec une précision quasi centimétrique,
- la détermination d'orbite à un même niveau est réalisable avec les modèles récents.

Les satellites LAGEOS constituent le point de référence le plus précis disponible en télémétrie laser et sont des cibles privilégiées pour le contrôle de la qualité des données du réseau laser depuis la création de l'ILRS.¹

Aujourd'hui, ces satellites étant moins prioritaires dans les campagnes d'observations que par le passé, ceci pourrait induire une dégradation des orbites et du repère fondamental, en dépit de l'amélioration des modèles de champ de gravité. En effet, les forces non gravitationnelles sont de moins en moins prévisibles en raison de la diminution de la vitesse de rotation angulaire propre à chaque satellite [Métris et al., 1997]. Cette imprévisibilité, source d'erreurs d'orbite, constitue une des raisons principales du choix de la durée des arcs de trajectoire (10 jours). Cette durée est désormais standard dans la plupart des centres d'analyse car l'efficacité moyenne du réseau laser sur 10 jours assure une répartition suffisante des données pour la détermination d'orbites précises. Le choix des orbites de 10 jours de durée nous semble un bon compromis compte tenu des hypothèses indiquées précédemment.

Au niveau du réseau de poursuite, un nombre suffisant de mesures de qualité bien réparties à la surface de la Terre est nécessaire et des observations continues sont en adéquation avec la précision recherchée du positionnement. En effet, moins il y a de mesures disponibles, plus les périodes de temps à considérer pour atteindre un même niveau de précision sont longues et dans ce cas il est de plus en plus difficile d'obtenir des séries temporelles de positionnement à court terme ou au moins à l'échelle de la saison. L'utilisation d'un réseau homogène est aussi une chose primordiale dans la recherche de signaux temporels. En effet, une mauvaise distribution des observations a un impact sur les orbites puisque, sans forte pondération, cela peut modifier leur géométrie et donc la composante radiale de l'orbite. Cet effet pourrait alors aisément être confondu avec un biais observationnel des stations laser ou une erreur systématique sur son altitude.

La première étape dans la détermination des orbites consiste à récupérer les mesures sur une base de données comme le CDDIS (*Crustal Dynamics data Center*, Munich) pour les stations, les satellites et les périodes considérés. Il est alors nécessaire d'appliquer aux mesures les corrections prévues par les standards actuels :

- station (excentricités...),
- centre de masse des satellites²,
- propagation dans l'atmosphère à partir des données météorologiques disponibles dans les fichiers de points normaux (modèle de Marini-Murray).

Les choix des modèles de champ de gravité, de repère de référence et de forces non gravitationnelles sont aussi essentiels dans une restitution d'orbite. Dans le cas présent, le modèle de champ de gravité est celui donné par GRIM5-S1 [Biancale et al., 2000] afin d'être en adéquation par rapport aux autres standards pris pour le calcul d'orbite (forces gravitationnelles de marées, variations temporelles du champ de gravité, ajustement de biais empiriques contrôlés sur les forces non gravitationnelles, ...). Le repère de référence utilisé est l'ITRF97 (*International Terrestrial Reference Frame*). On a pris délibérément le choix de ne pas prendre un jeu de coordonnées de référence issu uniquement d'une solution laser pure, même si cela ne place pas nos calculs d'orbite parmi les plus précis effectués à l'heure actuelle sur LAGEOS [Eanes, 1998], mais cela nous garantit une meilleure exactitude de la restitution d'orbite.

¹ Ces satellites ont été observés en priorité par toutes les stations laser, du moins jusqu'au début des années 1990. Puis, étant donné le nombre croissant de satellites bas à observer, leur priorité a diminué, sauf au cours de campagnes spécifiques (MERIT, 1983) ou plus récemment en 1997 et 1998. Ce type de campagne est pourtant nécessaire pour vérifier et maintenir la qualité du réseau laser.

² Par exemple, une nouvelle correction a été déterminée il y a environ 5 ans sur LAGEOS, apportant ainsi une modification de quelques millimètres.

Les orbites des satellites LAGEOS sont calculées avec le logiciel GINS¹, sans que les observations de la station laser Lune ne soient prises en compte, pour des raisons de contrôle. Certaines corrections géophysiques, comme les effets de variabilité du champ dues aux déplacements des masses atmosphériques, sont faites au niveau de la détermination d'orbite afin d'améliorer le calcul. Les effets géographiquement corrélés, éventuellement saisonniers, sont faibles à l'altitude des satellites LAGEOS, les signaux résiduels étant de quelques millimètres sur les orbites.

Après détermination des orbites dynamiques, une méthode géométrique développée au CERGA a été utilisée (logiciel CALTIM). Signalons que cette méthode a également servi à l'évaluation des orbites de TOPEX/POSEIDON [Bonfond et al., 1999 ; Bonfond et al., 1995] et à celles de GLONASS [Barlier et al., 2000]. Dans ce programme, l'idée est de traiter les orbites et les stations de façon géométrique. Dans notre étude cependant, il était hors de question de prendre les paramètres locaux d'orbite comme inconnues. On s'est donc confronté aux erreurs géographiquement corrélées dues au repère de référence, à l'atmosphère, aux mesures et aux modèles, les effets sur les coordonnées étant justement ceux à considérer. Concernant les erreurs liées à l'atmosphère, disposant de mesures deux couleurs et d'un repère très bien connu à chaque instant, on pourrait observer les phénomènes de variations saisonnières de l'atmosphère et donc apporter une correction correspondant au modèle de Marini-Murray. Ceci n'est pas le cas actuellement, mais en projet au CERGA (projet T2000). L'objet de cette analyse est également de décorrélérer au mieux les coordonnées de station et les biais instrumentaux non instantanés qui ne sont pas compensés par les mesures d'étalonnage.

La méthode géométrique nécessitant le choix d'un repère de référence puisque l'orbite est fixée, le système ITRF97 a été utilisé pour des raisons d'homogénéité avec la détermination des orbites dynamiques (GINS).

Le logiciel CALTIM permet de cumuler les matrices d'observation vis-à-vis des paramètres à déterminer, à savoir biais et coordonnées des stations pour la période de temps choisie.

Pour des raisons d'homogénéité de traitement, les corrections appliquées dans CALTIM sont cohérentes avec celles faites dans GINS (atmosphère, centre de masse du satellite, relativité, étalonnage des stations fourni dans les fichiers de mesures, paramètres de stations...). Concernant les variations des composantes verticales des coordonnées de station, une correction de marées terrestres luni-solaires de degré 2 issue des standards de l'IERS92 additionnée de l'onde diurne K1 a été appliquée. Ce standard avait été choisi jusque dans les années 1990 avec un bilan d'erreur de positionnement d'environ 5 mm au mieux [IERS, 1992]. L'ensemble des effets géophysiques non pris en compte devrait donc se retrouver dans les coordonnées de station issues du traitement géométrique. Ceux-ci comprennent :

- les nouveaux termes de marées terrestres publiés depuis l'IERS96 comme d'autres ondes diurnes K1. Ces effets ont été publiés avec un bilan d'erreur de 1 mm ou mieux [IERS, 1998].
- les effets de marées polaires² qui font référence aux variations de forces centrifuges dues aux mouvements du pôle et aux variations de la rotation terrestre. L'hypothèse d'élasticité de la Terre provoque une variation globale du champ de gravité et une déformation du réseau de quelques millimètres,
- les effets de charge difficilement prévisibles dus à l'atmosphère, aux océans et aux couvertures hydrologiques diverses (neige, quantité d'eau dans le sol et les sous-sols...). Leur modélisation ne fait pas appel à des mouvements de mécanique céleste bien connus comme ceux du Soleil par exemple, mis à part pour les effets de charge de marées océaniques dont la signature est prépondérante dans les ondes M2 et K1 et avec des périodes à 12 et 24 h (ondes principales).

¹ Logiciel développé par le GRGS à Toulouse.

² Dont la dénomination est ambiguë.

En conclusion de cette partie, la méthode employée est essentiellement une méthode géométrique appliquée aux satellites LAGEOS -1 et -2, à partir d'un repère de référence de type ITRF97. Les variations des coordonnées de stations et la décorrélation des biais instrumentaux sont calculées. Les variations de position, en dehors de celles dues aux marées terrestres de degré 2 sont faites à part pour des raisons de facilité d'étude des effets. Ceci est en cours d'implantation dans le logiciel CALTIM de façon systématique.

3.2. Les données étudiées

Cette étude est basée sur l'analyse des observations quasi simultanées des stations laser satellites et laser Lune sur les satellites LAGEOS -1 et -2 au cours des années 1997 à 1999. Les orbites de référence des satellites sont déterminées à partir des observations d'une douzaine de stations du réseau laser (voir partie 3.3. de ce chapitre) sur les 3 années considérées.

Cette campagne de co-localisation laser est alors complétée par des mesures continues de positionnement à partir du récepteur permanent du plateau de Calern et par des mesures régulières du gravimètre absolu FG5 (environ tous les 3 mois). L'analyse des séries temporelles est alors étendue au niveau mondial (Europe, Etats-Unis et Australie) en s'appuyant sur les variations saisonnières d'altitude déduites des observations laser et des orbites des mêmes satellites au cours des trois années concernées.

3.3. Orbitographie

La première étape de cette étude consiste en la détermination des orbites des satellites LAGEOS -1 et -2. Des arcs de trajectoire dynamique de 10 jours sont calculés à partir des observations de 12 des meilleures stations du réseau laser, meilleures selon les critères de l'ILRS (qualité des observations, valeur des résidus laser, nombre de passages et stabilité des biais). La liste des stations utilisées pour le calcul d'orbite est donnée dans le Tableau 3.1. Mais, chose très importante pour la suite de l'analyse des résultats, les mesures de la station laser Lune de l'OCA n'ont pas contribué à cette détermination d'orbites.

Tableau 3.1 : Stations utilisées pour le calcul d'orbites.

Numéro de station	Localisation	Région géographique
7080	Mc Donald	Etats-Unis (Texas)
7090	Yarragadee	Australie
7105	Greenbelt	Etats-Unis (Maryland)
7109	Quincy	Etats-Unis (Californie)
7210	Haleakala	Hawaii
7403	Arequipa	Pérou
7835	Grasse	France
7839	Graz	Autriche
7840	Herstmonceux	Grande Bretagne
7843	Orroral	Australie
7939	Matera	Italie

La détermination précise des orbites des satellites LAGEOS repose sur une connaissance précise du champ de gravité, des forces non gravitationnelles, des mouvements de l'axe de rotation de la Terre, des effets de marées et de variations du champ, ainsi que des positions des stations d'observations. Il est donc important de vérifier que tous les paramètres stockés dans les fichiers de données de base sont à jour et que tous les modèles utilisés sont récents, surtout dans la recherche d'un signal d'une amplitude éventuellement très petite (quelques millimètres), associé à des phénomènes géophysiques de plus en plus fins. Grâce à une évolution générale des systèmes de poursuite mondiaux, la modélisation d'orbite a atteint une précision centimétrique ayant des conséquences très favorables pour la qualité de nombreux produits de la géodésie spatiale.

Les calculs d'orbites ont été réalisés pour les années 1997 à 1999 par arcs de 10 jours avec le logiciel GINS. Les modèles et déterminations suivants ont été utilisés :

- Modèle de champ de gravité GRIM5-S1 avec une troncature du champ à l'ordre et au degré 50,
- accélération gravitationnelle déterminée en tenant compte de la Lune, du Soleil et d'autres planètes,
- coordonnées de station ITRF97 (système de l'IERS),
- coordonnées du pôle terrestre calculées et diffusées par l'IERS (EOP97),
- forces non gravitationnelles,
- coefficients empiriques de pression de radiation solaire directe, indirecte (rediffusée par l'albédo terrestre) et de pression de radiation liée au rayonnement infrarouge de la Terre,
- accélération due aux marées terrestres (IERS96),
- marées océaniques,
- accélération relativiste (modèle de Schwarzschild et effet Lense-Thirring),
- champs de pression atmosphérique annuels et semi-annuels pour le calcul des variations du champ de gravité,
- correction du centre de masse du satellite sur les mesures,
- correction relativiste au niveau de la mesure de distance,
- ajustement d'un biais tangentiel le long de la trace et à la période de révolution du satellite.

Le pas de l'intégration numérique utilisé est de 90 s (environ 150 points par révolution du satellite). Les modèles utilisés permettent d'assurer une erreur d'orbite (hors mesures) de 6-11 mm et des erreurs géographiquement corrélées bien plus faibles, de l'ordre de 2-3 mm.

La qualité de la restitution d'orbite a une importance considérable dans toute la suite de l'analyse présentée ici puisqu'elle sert de référence pour les calculs suivants, à savoir l'ajustement de biais et de coordonnées de station. Le Tableau 3.2 présente une estimation du bilan d'erreur pour des arcs de 10 jours d'orbites de LAGEOS avec les modèles utilisés.

Tableau 3.2 : Estimation du bilan d'erreur d'orbitographie sur LAGEOS pour des arcs d'orbites de 10 jours et les modèles indiqués au milieu de la période étudiée (d'après [Exertier, 1999]).

Source d'erreur	Ecart-type moyen (mm)
Champ de gravité (GRIM5-S1)	2-3
Forces non gravitationnelles	5-8
Marées, variations temporelles du champ	1-2
Coordonnées de stations (ITRF97)	3-5
Vitesses	1-3
Mouvement global résiduel du réseau	2-4
Mesures laser	10-20
Précision globale	12-23

La valeur moyenne de l'écart-type de tous les arcs de 10 jours est de $(2,0 \pm 0,3)$ cm pour la station laser satellites fixe et de $(2,0 \pm 0,6)$ cm pour la station laser Lune. A titre indicatif, cette même valeur est de $(2,2 \pm 0,6)$ cm pour la globalité des stations utilisées dans la détermination d'orbite. Toutes ces valeurs indiquent une bonne stabilité de la qualité des données au niveau de quelques millimètres pour toutes les stations considérées, y compris les deux stations laser fixes du plateau de Calern. L'écart-type moyen des résidus laser d'environ 2 cm provient des biais instrumentaux de chaque station, des erreurs de coordonnées des stations, d'erreurs dans la correction de la signature du satellite et du délai de propagation dans l'atmosphère, ainsi que des erreurs de détermination du champ de gravité. Cette valeur inclut donc tout ce qui peut varier selon la géométrie du passage de satellite au-dessus de la station d'observations.

Une étude de l'impact de l'utilisation ou non des mesures de la station laser Lune dans la détermination d'orbite a permis d'évaluer l'effet de la stabilité de l'orbite sur le positionnement des stations européennes. Celui-ci a été estimé à environ 5 mm, la modification de l'orbite étant d'autant plus forte que le nombre d'observations de la station ajoutée dans un sous-réseau donné est important. Il serait donc peut être souhaitable de ne considérer que quelques stations européennes (2 ou 3) pour le calcul des orbites de LAGEOS afin de ne pas créer un trop gros déséquilibre dans les contributions des observations réalisées sur les différents continents.

3.4. Biais instrumental moyen

A partir des orbites de LAGEOS, les matrices des équations normales des différents paramètres à estimer sont formées pour chaque arc de trajectoire et chaque station considérée. L'inversion de ces matrices normales s'effectue en estimant un certain nombre de paramètres géophysiques, orbitographiques ou de correction de stations. Les paramètres inconnus sont estimés par la méthode des moindres carrés.

Le premier des paramètres estimés correspond à une erreur systématique sur les mesures de distance. Il s'agit d'un biais (on retiendra ce terme dans la suite) incluant les résidus des erreurs systématiques liées aux corrections atmosphériques, aux effets de charge atmosphérique et océanique, à la distribution des données, à l'orbite, etc. On peut considérer que tous les effets de charge se

moyennent à quelques millimètres près sur l'échelle d'une année et ne se retrouvent pas dans le biais estimé. Ce biais est d'autant mieux décorrélé des déterminations des coordonnées que la diversité de configurations de passages au-dessus de la station est grande. Après plusieurs tests, un critère donnant le nombre de données nécessaires à cette étude a été défini. Ainsi, un minimum de 3 mois de données bien réparties dans l'espace et de 1 000 point normaux par satellite est nécessaire pour estimer un biais moyen instrumental et les coordonnées de la station. Ces valeurs correspondent également aux exigences de quantité d'observations de l'ILRS, à savoir environ 400 passages de LAGEOS par an.

3.5. Positionnement

Le second paramètre ajusté à partir des orbites de référence des satellites LAGEOS correspond à une correction de coordonnées par rapport aux valeurs indiquées dans l'ITRF97.

L'ajustement des coordonnées est réalisé après cumul des matrices normales pour différentes périodes : par décade, par mois, par saison et par année. Puis, à partir de ces nouvelles coordonnées, les séries temporelles des coordonnées géodésiques ajustées des stations sont tracées, une fois la validité des résultats vérifiée (évolution du nombre de données et de l'écart-type moyen des résidus après ajustement et répartition géographique des mesures). Les résultats de l'étude comparative de ce positionnement sont présentés plus loin.

Lorsque l'ajustement des coordonnées est réalisé tous les 10 jours, le signal est bruité car il n'y a pas assez de mesures. Après plusieurs essais, il s'est avéré qu'une période de 3 mois était nécessaire afin d'assurer une bonne couverture des différentes configurations de passages des satellites au-dessus des stations d'observations et donc un positionnement de qualité. Cependant, parfois le nombre d'observations est insuffisant pour décorréler le biais des coordonnées. Et ceci nous a amenés à déterminer un biais par année et par station.

4. Résultats

Les principaux résultats obtenus au cours de cette étude sont présentés ci-après. Ils concernent les valeurs des biais annuels moyens, le positionnement des stations laser de Calern et la mise en évidence d'un signal saisonnier. La composante verticale est ensuite comparée aux mesures de gravimétrie absolue et aux observations du récepteur GPS permanent du plateau de Calern. Enfin, ce signal saisonnier a été mis en évidence pour toutes les stations considérées sur divers continents : en Europe, aux Etats-Unis et en Australie.

4.1. Biais instrumental annuel moyen

Un biais annuel moyen est déterminé pour les trois ans d'observations considérés (1997 à 1999). Les valeurs sont indiquées dans Tableau 3.3. A titre indicatif, les biais estimés pour les stations de Graz (Autriche) et Herstmonceux (GB), figurant parmi les meilleures stations laser d'Europe, sont également indiqués.

Les résultats de cette analyse des données des stations laser du plateau de Calern pour l'année 1997 sont à prendre avec précaution en raison des changements de configuration des stations réalisés à cette période (installation d'un nouveau photodétecteur de retour sur la station laser satellites, réajustement du biais de la station laser Lune et nouveau mode de fonctionnement de son laser). En effet, un biais systématique entre les deux stations a été estimé à 9,87 cm pour la station laser Lune par l'analyse des données laser sur LAGEOS et correspond à un biais constaté depuis par des mesures d'étalonnage. Ainsi, la valeur de ce biais a été confirmée au niveau millimétrique par des mesures sur l'instrument et

la modifications de l'étalonnage géométrique de la station a été réalisée. Ce résultat montre une des forces de ce type d'analyse.

Tableau 3.3 : Biais annuels moyens (en mm) et nombre de points normaux utilisés pour leur détermination pour les années 1997 à 1999 estimés à partir des orbites des satellites LAGEOS -1 et -2.

Station	Biais moyen (mm)	Nombre de points normaux	Biais moyen (mm)	Nombre de points normaux	Biais moyen (mm)	Nombre de points normaux
	1997		1998		1999	
Grasse SLR	$-7,6 \pm 2,2$	1931	$-2,9 \pm 0,7$	9323	$-7,3 \pm 1,4$	3305
Grasse LLR	*	1497	$1,1 \pm 1,3$	4741	$-3,2 \pm 1,6$	3264
Graz	$1,7 \pm 0,7$	8278	$4,1 \pm 0,7$	8268	$0,1 \pm 0,8$	9339
Herstmonceux	$2,5 \pm 0,9$	9638	$1,7 \pm 1,0$	8248	$2,3 \pm 1,0$	10234

* La valeur du biais estimée n'est pas mentionnée en raison du réajustement de celui-ci en cours d'année.

L'analyse des résidus laser a donc permis d'estimer des biais annuels moyens, tous sub-centimétriques. Ces valeurs présentent une très bonne stabilité des stations laser à ce niveau sur 3 ans, ce qui est tout à fait satisfaisant en termes de référence technologique en télémétrie laser. Ce point est particulièrement important pour les études des phénomènes physiques et géodynamiques à long terme.

4.2. Séries temporelles laser à l'OCA

On peut réaliser l'ajustement des coordonnées de station avec un biais instrumental fixé ou non. Dans le cas présent, étant donnée la stabilité annuelle du biais au niveau de quelques millimètres, il n'a donc plus été libéré dans la détermination des coordonnées sur 3 mois. D'autre part, comme il y a une bonne répartition des observations sur la durée considérée, on s'assure a priori aussi d'une bonne décorrélation entre l'altitude et le biais instrumental.

Des corrections aux 3 coordonnées de station (altitude r , latitude φ et longitude λ) sont déterminées relativement au système de référence ITRF97 donnant les positions et les vitesses de déplacement de chaque station.

Les points présentés sur les graphiques donnés plus loin représentent une valeur de coordonnée estimée à partir de 3 mois d'observations, chaque point étant décalé d'un mois par rapport aux autres. Ainsi, une fenêtre glissante permettant de montrer l'évolution temporelle du positionnement, et en particulier de l'altitude, a été utilisée. Mais chaque point représenté n'est alors pas complètement indépendant. Cela permet aussi de vérifier que le signal saisonnier ainsi mis en évidence n'est pas le résultat d'un point isolé.

Dans un premier temps, une comparaison des séries temporelles de coordonnées des stations laser satellites (7835) et laser Lune (7845) a été effectuée. La Figure 3.1 illustre les différences entre le positionnement déterminé pour chacune des deux stations laser par cumul des observations de LAGEOS -1 et -2, ce qui assure un meilleur ajustement.

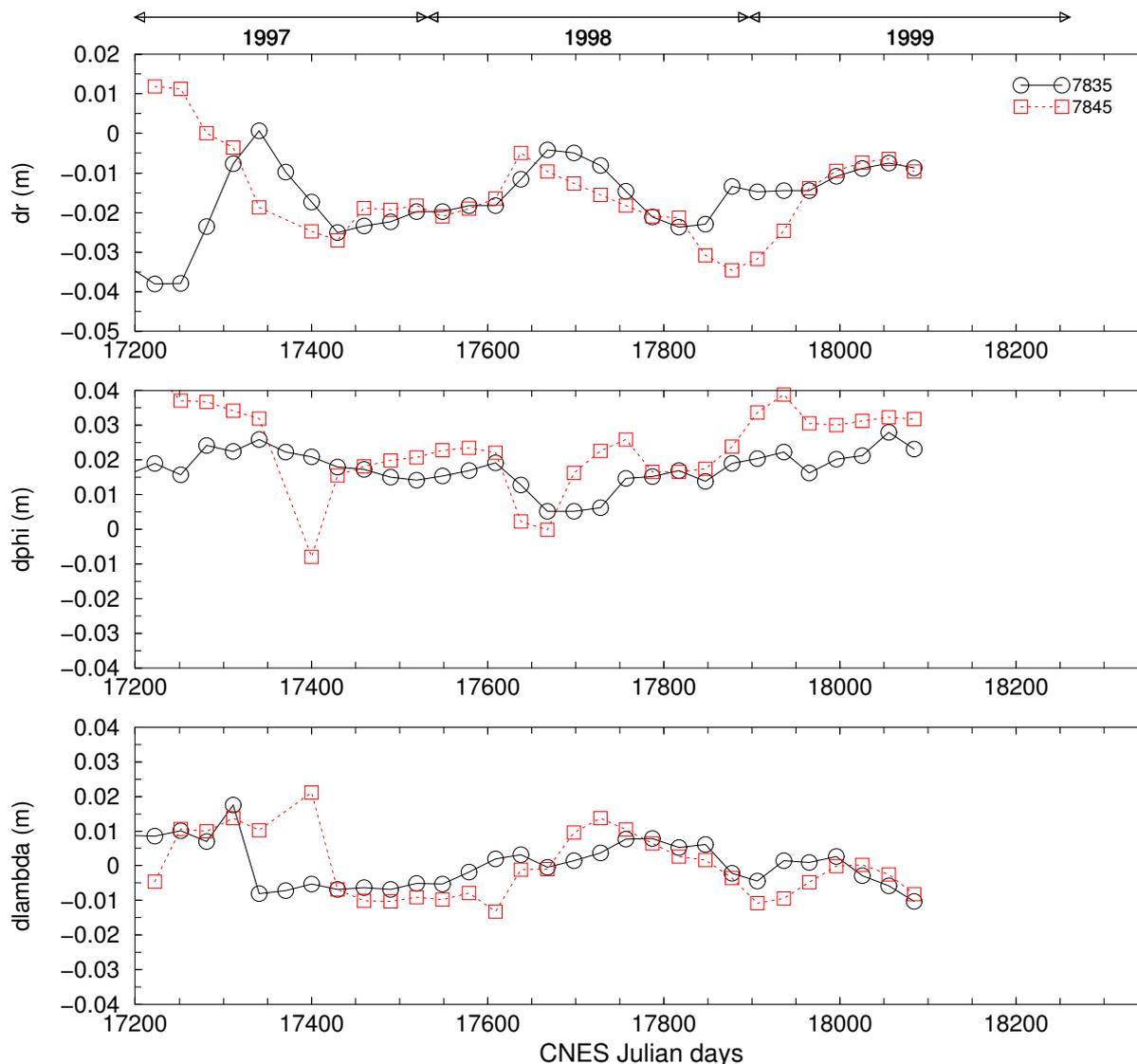


Figure 3.1 : Différences d’ajustement de coordonnées des stations laser satellites (7835) et laser Lune (7845) du plateau de Calern. Ce positionnement a été déterminé à partir du cumul des matrices normales pour les satellites LAGEOS -1 et -2 et par rapport à l’ITRF97. Les valeurs sont indiquées en mètres.

Le positionnement simultané est quasiment identique, si on fait abstraction du début de l’année 1997 et d’écarts localisés liés en premier lieu à des différences de couverture des observations au-dessus de chaque station. Les différences des corrections de coordonnées par rapport aux valeurs indiquées par l’ITRF97 entre les deux stations figurent pour les trois coordonnées dans le Tableau 3.4. Ces valeurs correspondent aux différences entre les coordonnées ajustées dans notre calcul et celles fournies par l’ITRF97, en tenant compte de l’excentricité entre les deux stations. A titre indicatif, les écarts entre les biais instrumentaux moyens sont également indiqués. Les différences entre les coordonnées pourraient être expliqués par les différences de biais, ce qui montre la limite de ces calculs qui semble se situer au niveau de 4 mm en absolu.

La cohérence entre les deux stations apparaît clairement bien qu’il s’agisse d’instruments et de calculs tout à fait indépendants puisque les observations de la station laser Lune n’ont pas participé à la détermination des orbites des satellites LAGEOS. Les données de cette station ont en effet été

injectées dans la méthode géométrique (CALTIM) comme celles d'une autre station quelconque dans l'ajustement. Tout ceci renforce la confiance que l'on peut avoir dans l'accord entre les variations d'altitude des deux stations présentées Figure 3.1.

Tableau 3.4 : Différences des ajustement de coordonnées entre la station laser satellites et la station laser Lune du plateau de Calern. Ces valeurs sont estimées en millimètres à partir des ajustements de coordonnées issus du cumul des observations des satellites LAGEOS -1 et -2 au cours des années 1997 à 1999. A titre indicatif les différences de biais entre les deux stations sont également indiquées.

	$dr(7835)-dr(7845)$ (mm)	$d\phi(7835)-d\phi(7845)$ (mm)	$d\lambda(7835)-d\lambda(7845)$ (mm)	Ecart des biais (mm)
1997	-11 ± 23	-6 ± 15	-2 ± 11	9
1998	4 ± 7	-4 ± 7	2 ± 7	4
1999	3 ± 7	-11 ± 4	2 ± 5	4

L'accord entre les valeurs des coordonnées, y compris d'altitude, des deux stations laser fixes du plateau de Calern étant très bon au niveau de quelques millimètres, la suite ne sera plus illustrée que par les séries temporelles relatives à la station laser satellites en raison du plus grand nombre de données disponibles.

Le Tableau 3.5 indique les valeurs d'excentricité obtenues d'après cette analyse en comparaison de celles données par l'ITRF97 et de celles issues de mesures de rattachement géodésique réalisées par l'IGN en 1999. Les excentricités indiquées correspondent aux différences de coordonnées entre les deux stations laser fixe du plateau de Calern dans le sens : $\Delta r = r(7835) - r(7845)$. L'accord entre toutes ces valeurs d'excentricité est acceptable compte tenu des incertitudes des différentes déterminations (5-10 mm).

Tableau 3.5 : Comparaison entre différentes estimations des valeurs d'excentricité entre les deux stations laser satellites fixe et laser Lune du plateau de Calern.

	Δr (m)	$\Delta\phi$ (m)	$\Delta\lambda$ (m)
Cette étude	-0,530	-36,487	4,417
IGN 1999	-0,541	-36,489	4,420
ITRF97	-0,542	-36,489	4,421

Les résultats du positionnement de la station laser satellites du plateau de Calern sont indiqués sur la Figure 3.2, à la fois à partir des mesures acquises sur chaque satellite, puis à partir du cumul des matrices normales. La cohérence entre les différentes solutions est très bonne à peu d'exceptions près, ce qui donne confiance dans le positionnement et les séries temporelles obtenues. Les écart localisés entre les différentes solutions obtenues séparément pour chaque satellite proviennent probablement d'une déficience dans la répartition des données et se voit donc plus clairement sur la longitude (λ) et la latitude (ϕ). Ces écarts sont compensés dans la solution globale regroupant les observations des deux satellites.

Les courbes montrent des effets saisonniers plus particulièrement marqués sur la composante verticale avec une amplitude de l'ordre de 2 cm crête à crête. Le trait vertical indique la période d'implantation du nouveau photodétecteur de retour (fin septembre 1997). Compte tenu de la stabilité des stations laser indiquée précédemment (au moins pour ce lot de données et pour la configuration télémétrique adoptée depuis 1997), ces fluctuations saisonnières du positionnement vertical peuvent être principalement assimilées à un signal géophysique dont nous reparlerons plus loin.

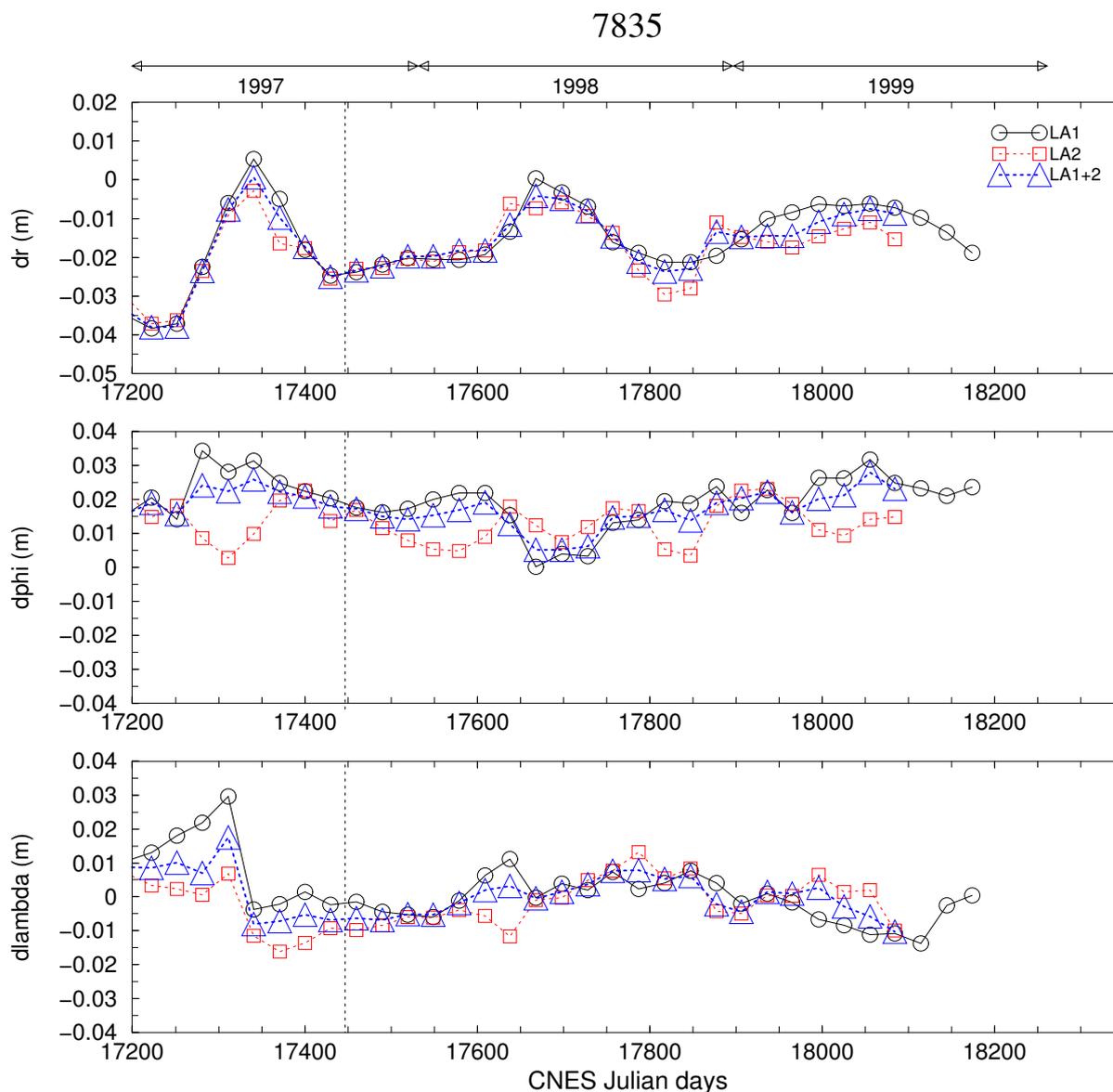


Figure 3.2 : Variations saisonnières observées sur 3 ans d'ajustement de coordonnées à partir des mesures de la station laser satellites fixe du plateau de Calern sur les satellites LAGEOS -1 et -2 et par cumul des observations sur les deux satellites. Les ajustements de coordonnées sont déterminés à partir de l'ITRF97 et sont indiqués en mètres. Le trait vertical indique la date de changement du photodétecteur de retour (fin septembre 1997).

On peut également noter une différence systématique entre le positionnement obtenu à l'issue de cette analyse et les valeurs de coordonnées fournies par l'ITRF97. Ces différences, données dans le Tableau 3.6, peuvent être liées au fait que ce système est basé sur des mesures moins récentes que les observations utilisées dans l'analyse présentée ici et que l'ITRF fournit un positionnement issu d'une solution globale à partir des mesures de plusieurs techniques. En effet, compte tenu des modifications technologiques des stations considérées, il peut y avoir des différences par rapport aux mesures passées. Mais d'un autre côté, des différences systématiques sont également observées pour d'autres stations du réseau mondial. De plus, nous ne pensons pas qu'il s'agisse d'un problème de biais de station dans la mesure où ces résultats sont la moyenne de plusieurs milliers de points normaux sur les deux satellites LAGEOS, avec une bonne distribution géographique des observations. De plus, le biais estimé est bien décorrélé. En tout état de cause, ces solutions sont environ à 10-15 mm de l'ITRF, ce qui correspond à la précision de la solution laser par rapport à l'ITRF.

Tableau 3.6 : Différences entre les coordonnées moyennes de la station laser satellites fixe du plateau de Calern et le repère ITRF97.

	dr (mm)	dphi (mm)	dlambda (mm)
1997	-23 ± 12	19 ± 4	2 ± 9
1998	-15 ± 7	13 ± 5	2 ± 4
1999	-11 ± 3	22 ± 3	-3 ± 4

On peut aussi mentionner la difficulté de l'IERS à prendre en compte des modifications instrumentales. Notre analyse offre l'avantage d'être « à jour » vis-à-vis des données et de la connaissance des problèmes instrumentaux que l'on essaye d'intégrer dans le traitement. En effet, lorsque les modifications instrumentales ne sont pas prises en compte, leurs effets se retrouvent dans le repère de référence, d'où l'existence de limites dans l'interprétation du positionnement des stations laser fourni par l'ITRF, positionnement déterminé avec des problèmes instrumentaux plus ou moins moyennés. Une autre remarque peut être faite à propos de la différence de coordonnées entre la solution issue de l'analyse des observations des satellites LAGEOS et le positionnement fourni par l'ITRF. En effet, entre les repères ITRF94, 96 et 97, d'importantes différences entre l'altitude de la station laser satellites du plateau de Calern sont apparues alors qu'elles ne peuvent s'expliquer par la tectonique (environ 15 mm entre ITRF96 et 97 sur la composante Z).

Ainsi, des calculs complètement indépendants entre les deux stations ont conduit à des résultats cohérents en ce qui concerne le rattachement entre les deux stations (<5 mm), leurs coordonnées et leurs vitesses moyennes. Dans toute la suite de l'analyse locale présentée ici, on ne considérera plus que les variations d'altitude dans la mesure où il s'agit de la coordonnée la moins sensible à une mauvaise répartition des passages observés au-dessus de la station considérée. De plus, le signal saisonnier observé est plus marqué sur cette composante.

4.3. Comparaison avec les mesures gravimétriques et GPS

L'étude des signaux saisonniers observés à partir du positionnement laser, notamment sur la composante verticale, a été approfondie à un niveau local en comparant les séries temporelles laser à des observations gravimétriques et au positionnement du récepteur GPS permanent du plateau de Calern. Le problème qui se pose alors est de combiner au mieux différentes mesures ayant des résolutions spatio-temporelles complètement différentes (24 h pour GPS, 3-4 jours pour le gravimètre, 3 mois pour le positionnement laser).

4.3.a Gravimétrie

La comparaison avec les mesures absolues de gravité est réalisée à partir des campagnes d'observations menées au plateau de Calern par une équipe de l'EOST (Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre de Strasbourg) avec le gravimètre absolu transportable FG5 (voir Annexe C). Dans un premier temps, deux points de référence ont été choisis sur le plateau de Calern. Un des deux points de mesures correspond à un point de référence localisé près du pilier de la station laser Lune et l'autre se trouve dans une cave spécialement aménagée, à environ 450 m du premier (bâtiment Sémirot). Les mesures gravimétriques se répartissent de janvier 1998 à janvier 2000 et les valeurs sont indiquées dans le Tableau 3.7. Ces mesures sont corrigées de tous les effets géophysiques connus.

Tableau 3.7 : Données gravimétriques (en μGal) fournies par J. Hinderer et M. Amalvict.

période	Point gravimétrique dans la cave (G)	Point gravimétrique sous la station laser Lune (L)
Janvier 1998	980 215 552,7 \pm 2,9	980 216 328,7 \pm 2,6
Avril 1998	980 215 553,4 \pm 2,7	**
Juillet 1998	980 215 547,1 \pm 1,8	980 216 322,7 \pm 1,7
Octobre 1998	980 215 549,3 \pm 1,4	**
Janvier 1999	980 215 545,9 (mesure à éliminer) *	980 216 329,0 \pm 2,6
Octobre 1999	980 215 548,6 \pm 4,2	980 216 322,3 \pm 2,3
Janvier 2000	980 215 552,4 \pm 2,3	980 216 327,0 \pm 2,2

* problèmes de correction de pression atmosphérique.

** mesure non effectuée.

Les variations de gravité sont converties en déplacement vertical de manière classique, le gradient utilisé étant de $-0,2 \mu\text{Gal}/\text{mm}$, valeur tenant compte du type de roche et du cas spécifique du relief du plateau de Calern (relief karstique). L'accord entre ces variations d'« altitudes gravimétriques » et celles déduites des observations laser est très bon, à la fois en phase et en amplitude en 1998 et 1999. La Figure 3.3 représente la série temporelle issue du positionnement laser, les mesures de gravimétrie absolue (station gravimétrique G et station laser Lune L) ainsi que la composante verticale du positionnement GPS.

Une variation de la mesure de g est donc également observée avec une période annuelle. Une étude de la structure et de l'hydrologie du plateau de Calern a montré que les variations de la mesure de g observées ne peuvent pas être expliquées par des phénomènes hydrogéologiques dans le karst.

La similitude entre les variations d'altitude fournies par les mesures gravimétriques et celles déduites des résidus laser est à souligner car les deux méthodes d'observations sont totalement indépendantes. Cependant, il y a parfois désaccord entre deux déterminations d'altitude. Plus de mesures comparatives sont certainement nécessaires pour aller plus loin dans l'analyse.

4.3.b GPS

La comparaison a également été faite (voir Figure 3.3) entre les résultats du positionnement obtenu avec les observations laser et les mesures du récepteur GPS permanent du plateau de Calern (données fournies par E. Calais, GéoscienceAzur à Sophia-Antipolis).

La solution GPS a été obtenue en réalisant une mise en référence pour chaque solution quotidienne par une transformation à 7 paramètres sur l'ITRF97 en utilisant 5 stations européennes de référence dont Grasse ne fait pas partie. Un filtrage par moyenne glissante sur 90 jours a été réalisé. Le signal est corrigé des marées terrestres, de la marée polaire mais aucun effet de charge n'a été pris en compte. L'amplitude du signal est de 1 cm crête à crête sur l'année.

La comparaison des variations d'altitude avec les mesures GPS n'est pas concluante aujourd'hui.

Une des difficultés tient à la nécessité de déterminer simultanément la correction troposphérique avec l'altitude de la station tandis que les deux grandeurs sont très corrélées.

La Figure 3.3 indique les différentes déterminations d'altitude obtenues avec les différentes techniques indiquées précédemment pour les années 1997 à 1999. L'origine commune est arbitraire. Avant de commenter la comparaison, ayons présent à l'esprit que :

- la courbe noire (signal GPS) correspond à un filtrage à 90 jours de mesures journalières,
- les points gravimétriques sont des moyennes sur quelques jours,
- le positionnement laser est issu d'une détermination sur 90 jours.

Les tendances générales sont cohérentes avec l'existence d'un signal inter-annuel et les désaccords les plus visibles se situent :

- au début de la série temporelle (cela peut être expliqué par des mesures laser de moins bonne qualité en raison de l'utilisation d'un photomultiplicateur),
- au cours de l'année 1998.

La corrélation n'est donc pas spectaculaire mais certaines tendances se dessinent. Cette comparaison pose le problème essentiel de confronter des mesures non équivalentes statistiquement.

Cela montre l'importance de poursuivre de telles expériences pour mieux comprendre l'origine des variations saisonnières observées et les désaccords plus ou moins ponctuels entre le signal GPS et le positionnement laser (effets de propagation des signaux dans l'atmosphère, variations saisonnières de la troposphère et de l'ionosphère...).

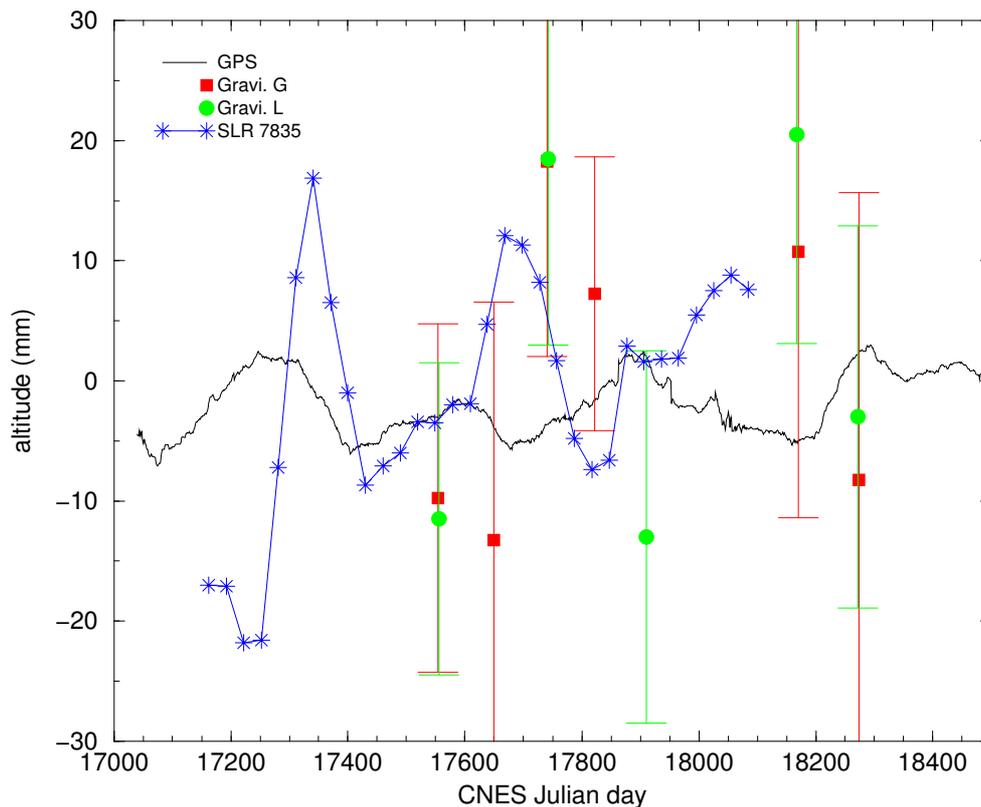


Figure 3.3 : Comparaison des variations d'altitude du plateau de Calern obtenues à partir des mesures laser (étoiles), des points gravimétriques G et L (ronds et carrés) et du signal GPS (ligne continue). L'origine est arbitraire et les valeurs sont indiquées en millimètres.

Nous devons donc considérer aujourd'hui la comparaison des mesures, comme un problème non encore résolu et ouvert. Il faut donc poursuivre l'analyse des mesures, de façon très méticuleuse, puisque les effets recherchés sont petites à la limite des capacités instrumentales de chaque technique (au maximum 1 cm crête à crête). Il faudra aussi vérifier que les corrections appliquées à chaque type de mesures sont compatibles entre elles et qu'elles sont correctement faites.

4.4. Etude plus globale

L'étude menée a permis de déterminer des séries temporelles pour toutes les stations laser dès lors que le nombre, la qualité et la stabilité des données sont suffisants pour déceler des variations temporelles dans le positionnement laser. Les Figure 3.4 à Figure 3.11 illustrent le positionnement laser obtenu pour différentes stations situées sur différents continents (Europe, Etats-Unis, Australie).

D'après ces séries temporelles, on peut conclure à l'existence au niveau mondial de variations inter-annuelles sur les trois composantes du positionnement laser.

Ces résultats peuvent être résumés comme suit :

- les variations saisonnières d'altitude sont bien en phase pour toutes les stations européennes considérées (minimum en fin d'année),
- un léger décalage est observé pour la station de Greenbelt (7105) qui se trouve sur la côte Est des Etats-Unis et le déphasage est plus marqué pour les deux autres stations américaines, à savoir Mac Donald au Texas (7080) et Monument Peak (7110) en Californie (maximum en fin d'année), ainsi que pour la station australienne de Yarragadee (7090),
- la série temporelle de la station d'Arequipa au Pérou est très perturbée probablement en raison d'un nombre d'observations trop faible pour ce genre d'analyse ; cette station a tout de même été considérée afin de visualiser les variations saisonnières au niveau le plus global possible à la surface de la Terre,
- concernant la station d'Halekala à Hawaii, les coordonnées obtenues au-delà du jour julien 17847 ne sont plus à considérer en raison d'une forte diminution du nombre d'observations ; cependant on peut noter une forte variabilité de la composante φ peut être liée à la situation particulière de cette station (sur un volcan au milieu du Pacifique).

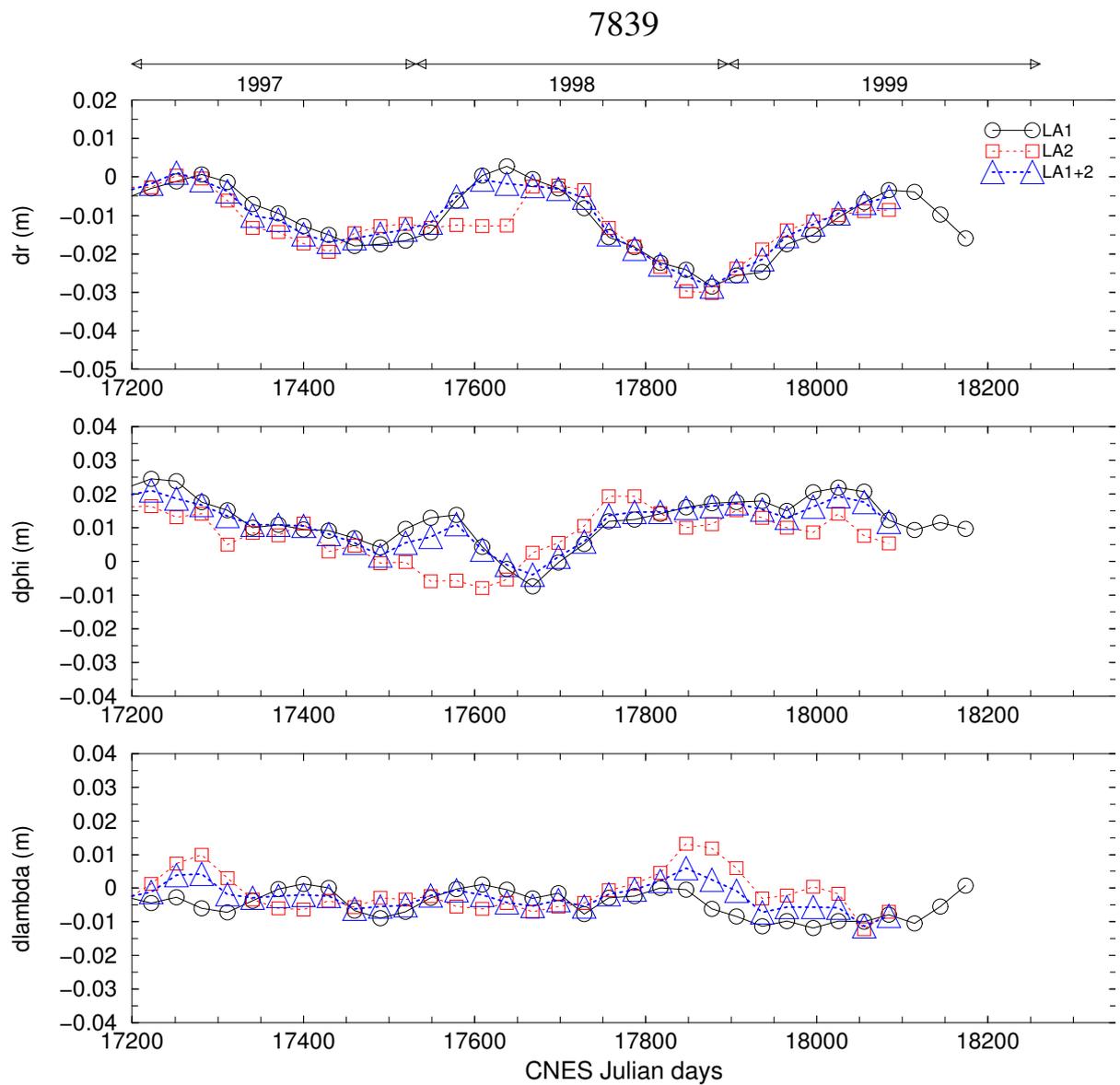


Figure 3.4 : Série temporelle du positionnement de la station de **Graz** (7839) en **Autriche** pour les années 1997 à 1999 à partir des observations des satellites LAGEOS-1 et -2.

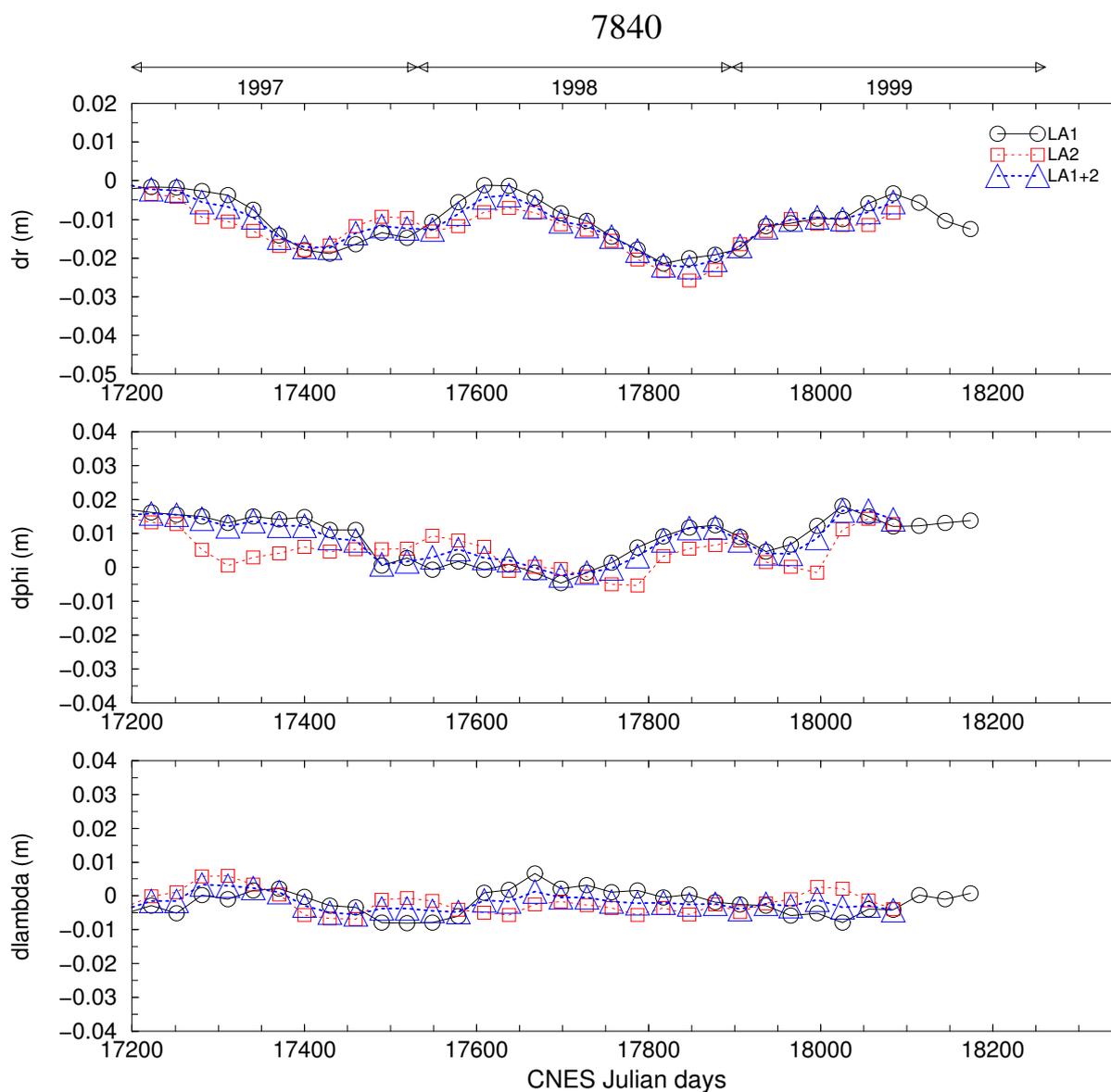


Figure 3.5 : Série temporelle du positionnement de la station de **Herstmonceux (7840)** en **Grande-Bretagne** pour les années 1997 à 1999 à partir des observations des satellites LAGEOS-1 et -2.

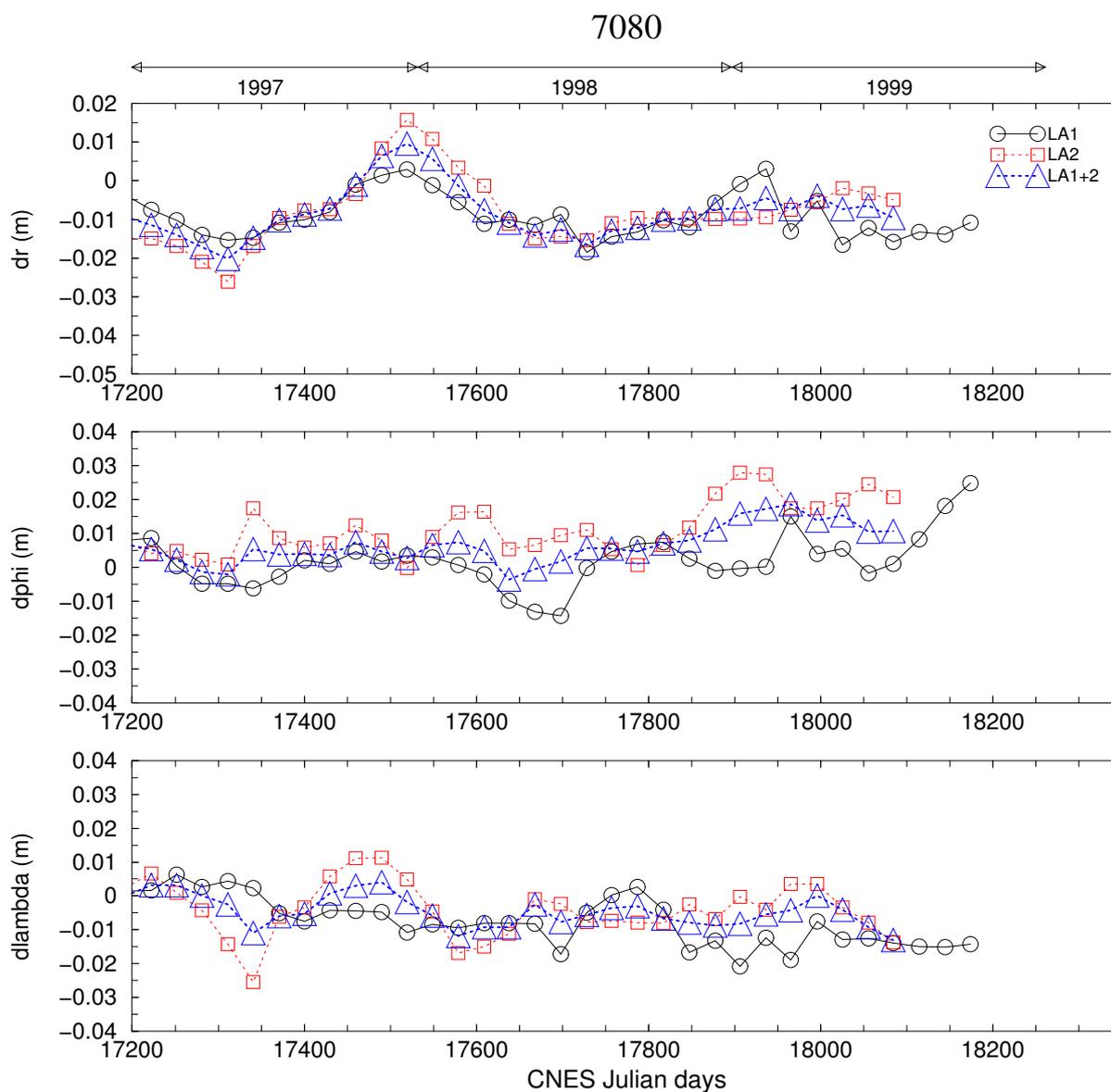


Figure 3.7 : Série temporelle du positionnement de la station de **Mc Donald (7080)** aux **Etats-Unis** (Texas) pour les années 1997 à 1999 à partir des observations des satellites LAGEOS-1 et -2.

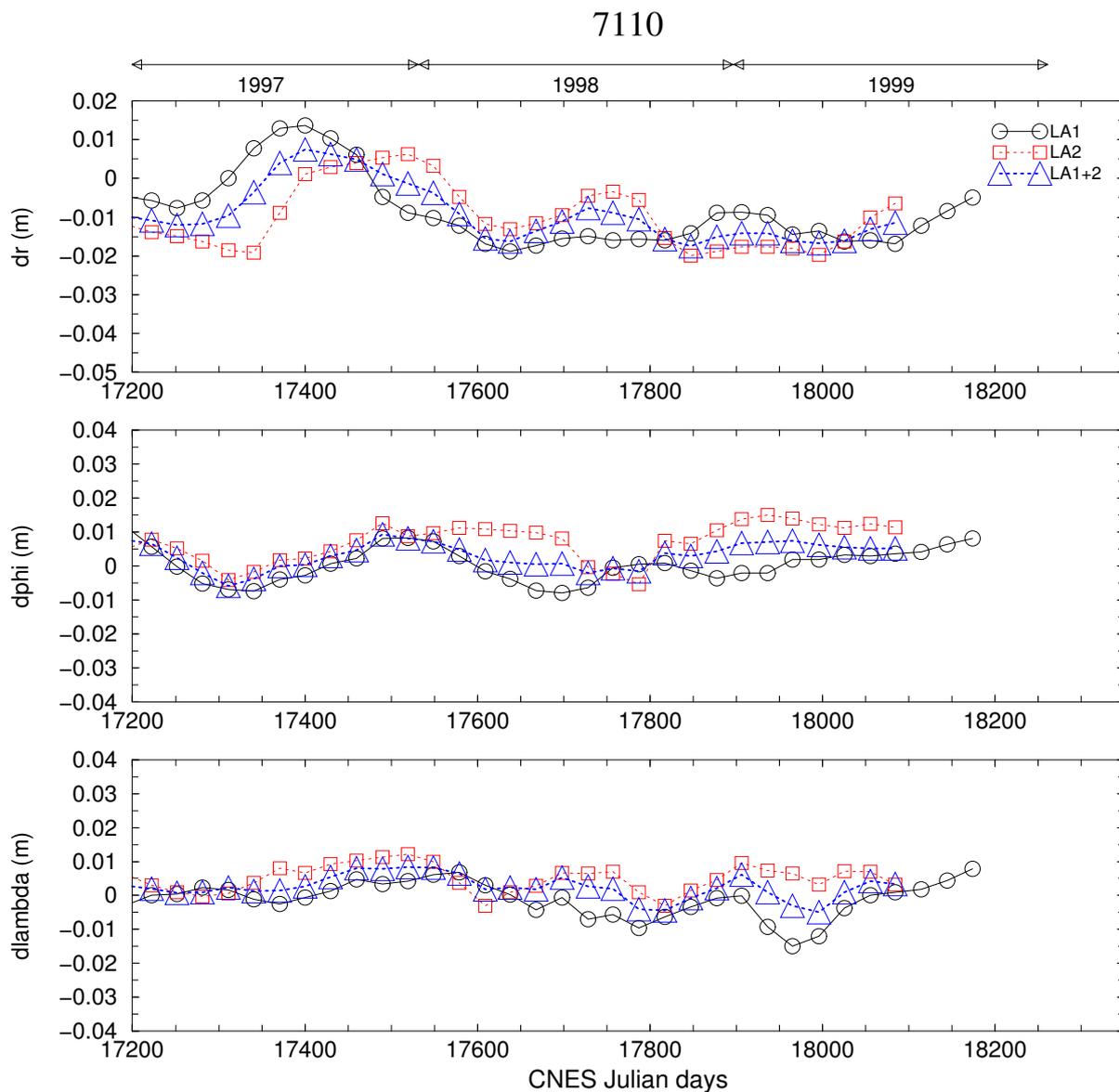


Figure 3.8 : Série temporelle du positionnement de la station de **Mt Peak (7110)** aux **Etats-Unis** (Californie) pour les années 1997 à 1999 à partir des observations des satellites LAGEOS-1 et -2.

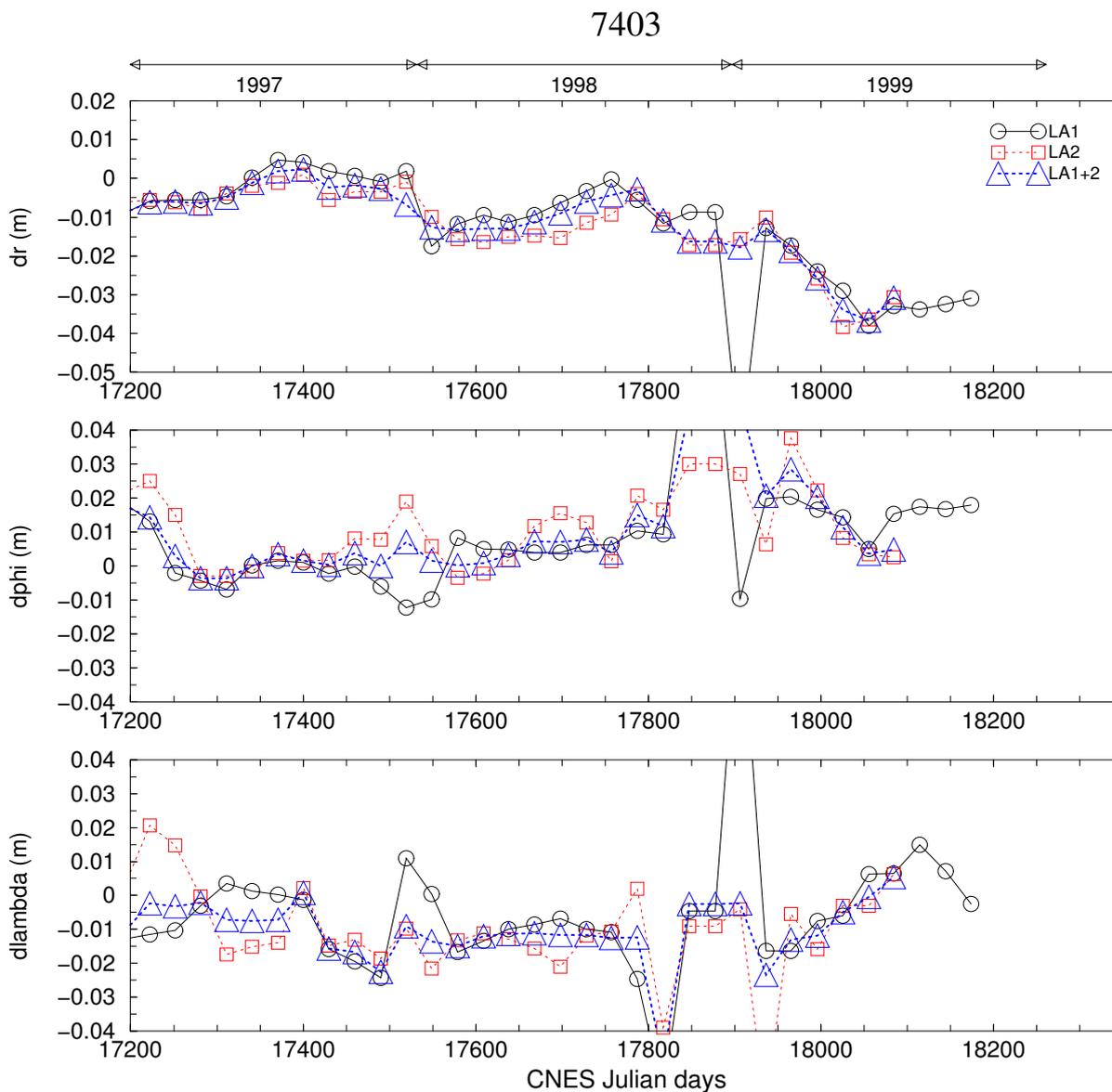


Figure 3.10 : Série temporelle du positionnement de la station d’Arequipa (7403) au Pérou pour les années 1997 à 1999 à partir des observations des satellites LAGEOS-1 et -2.

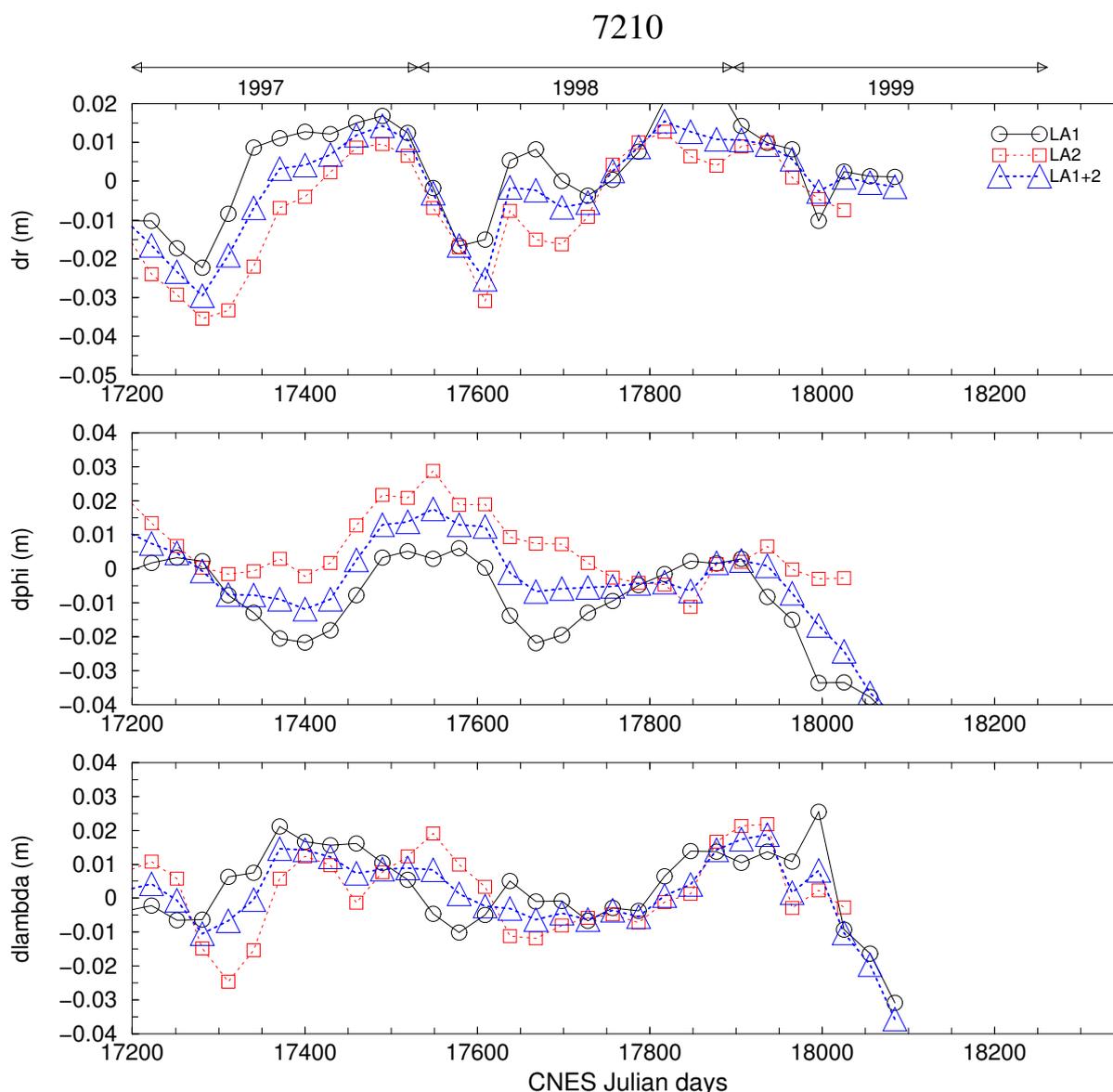


Figure 3.11 : Série temporelle du positionnement de la station d'**Haleakala** (7210) à **Hawaii** pour les années 1997 à 1999 à partir des observations des satellites LAGEOS-1 et -2.

L'évolution temporelle du positionnement des stations laser à partir des observations des satellites LAGEOS -1 et -2 a également été vérifiée avec une méthode de calculs dynamique (GINS). Ainsi, en collaboration avec J.M. Lemoine du GRGS à Toulouse j'ai refait, une étude comparative au niveau de l'Europe.

Les orbites de référence sont déterminées avec le même logiciel (GINS), avec quelques différences dans les paramètres d'entrée (stations laser, modélisations des forces ...). Puis, tout le reste des ajustements de coordonnées est réalisé de manière complètement différente (équations normales, cumul et inversion des matrices), l'orbite et les coordonnées étant traitées simultanément dans la méthode dynamique. Les résultats ainsi obtenus sont donnés dans la Figure 3.12. Chaque point correspond à un mois de données laser sur les deux satellites. Les courbes en gras représentent les variations d'altitude des stations laser de Grasse (7835 et 7845), de Graz (7839) et d'Herstmonceux (7840) « brutes » pour l'année 1998. Les courbes en traits fins représentent, quant à elles, le résultat de la série temporelle sur 3 ans après ajustement des coordonnées moyennes des stations du réseau laser

(formant la solution du repère de référence GRIM5). Cet ajustement a été réalisé afin d'enlever la différence systématique observée entre le positionnement déterminé à partir des observations laser et les valeurs d'ITRF97. On peut noter que la solution GRIM5, évaluée dans le cadre de l'IERS, se trouve à 15 mm (rms) de l'ITRF97 en moyenne¹.

Ces résultats confirment ceux obtenus avec la méthode explicitée dans la troisième partie de ce chapitre. Ainsi, le signal observé a bien une origine géophysique et ne peut être associé à la méthodologie employée. Cette analyse montre également qu'une durée de 1 ou 3 mois pour le cumul des matrices des équations normales n'a d'influence a priori que sur le bruit de la série temporelle issue de l'ajustement des coordonnées.

De plus, la corrélation entre les meilleures stations du réseau européen considérées ici est spectaculaire. Ces variations inter-annuelles n'avaient jamais été mises en évidence par la télémétrie laser avant cette étude car la précision des mesures et des modèles ne le permettait pas. Notre résultat est en cela original.

Evolution temporelle des hauteurs de stations

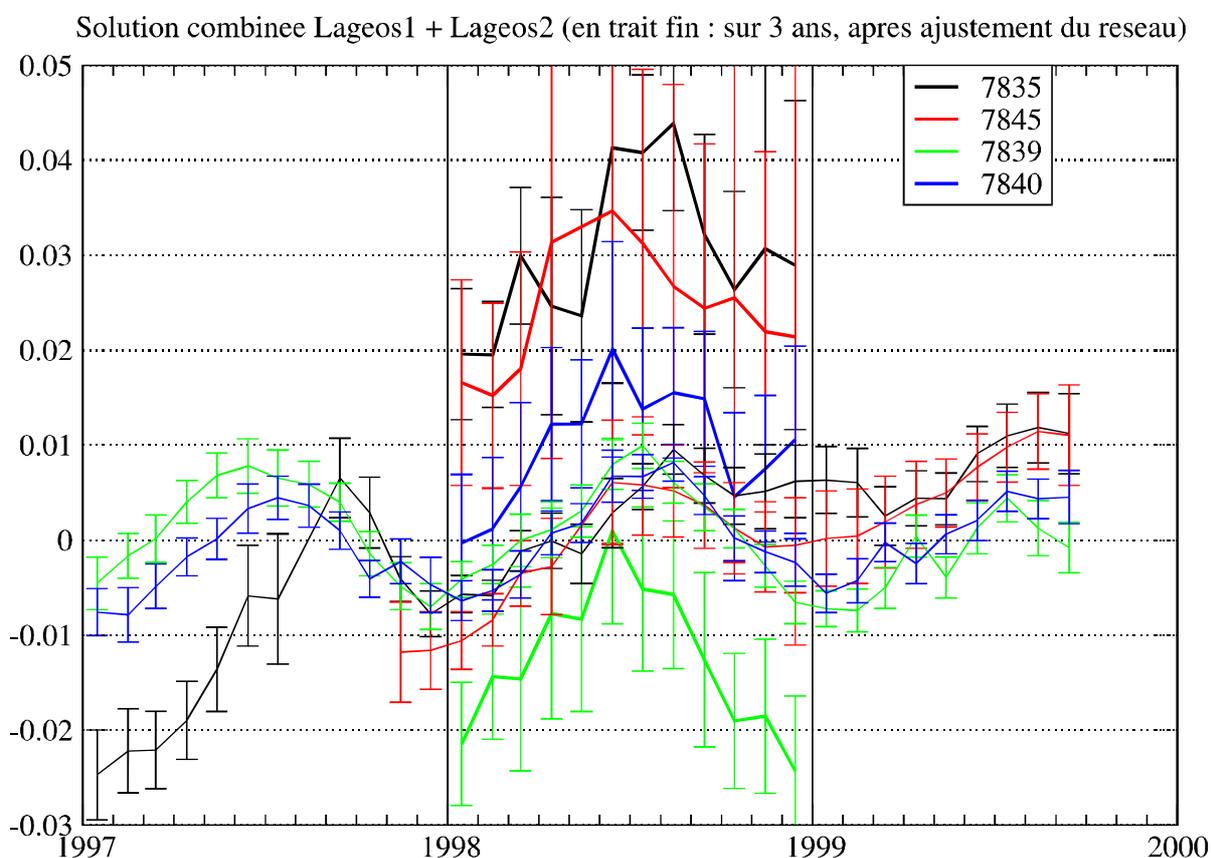


Figure 3.12 : Série temporelle du positionnement des stations européennes de Grasse, Graz et Herstmonceux à partir des calculs obtenus au GRGS à Toulouse, avec (en traits fins) et sans (en gras) ajustement du réseau de stations. Ce positionnement est réalisé chaque mois.

¹ Rappelons que GRIM5 est un modèle du champ de gravité et du repère de référence (laser et DORIS) réalisé au GRGS (Toulouse et Grasse) en collaboration avec le GFZ (institut allemand à Berlin) [Biancale et al., 2000].

5. Analyse des sources de variations d'altitude

Avant toute interprétation géophysique du signal observé, il est essentiel de rappeler à ce niveau que les séries temporelles laser obtenues sont corrigées des effets de la tectonique (vitesses de déplacement des stations fournies par l'ITRF97) ainsi que des effets de marées terrestres avec correction de l'onde diurne K1 (développement du 1^{er} ordre). Par contre, les déformations crustales dues aux variations de pression atmosphérique et aux effets de charge océanique (en principe faible à Grasse) n'ont pas été corrigées.

Diverses origines des signaux inter-annuels d'altitude existent :

- Tout d'abord, on pourrait penser aux mouvements du **géocentre**, mais leurs amplitudes ne sont que de 2-3 mm sur les coordonnées x , y et z [Bouillé, 2000]. De plus, lors de l'analyse menée avec J.M. Lemoine nous obtenons les mêmes variations de positionnement en prenant en compte le mouvement du géocentre,
- On pourrait également penser à une erreur d'**orbite** puisque l'orbite contribue au calcul des coordonnées de stations. Cependant, comme les conditions initiales des orbites changent tous les 10 jours, les orbites sont indépendantes et ne peuvent induire une erreur à long terme pouvant expliquer les variations constatées,
- Plus particulièrement, les effets observés ne peuvent être liés à des variations saisonnières de l'**aplatissement dynamique J_2** (variations essentiellement atmosphériques) dans la mesure où les orbites servant de référence au positionnement sont réajustées tous les 10 jours. Donc, même si les variations annuelles et semi-annuelles de J_2 n'ont pas été prises en compte, comme leurs effets relatifs sont d'environ 10^{-11} sur 10 jours, cela correspondrait seulement à une variation de 1-3 mm sur la position du satellite. Cela ne peut donc expliquer l'amplitude du signal observé sur les coordonnées des stations,
- L'erreur de correction des **effets troposphériques** est de l'ordre de 5 mm, mais comme les positions de stations sont déterminées tous les 3 mois, les effets atmosphériques sont a priori moyennés ; cependant, certaines variations saisonnières dans les profils verticaux existent,
- On pourrait aussi penser à des problèmes de **pondération des mesures**¹ des différentes stations dans les calculs d'orbite. Mais comme seules 12 des meilleures stations ont été utilisées pour la détermination d'orbite, cela n'influe a priori pas sur nos résultats,

Il reste donc les améliorations du modèle de marées terrestres, la marée polaire et les effets de charges non pris en compte jusqu'ici dans cette étude.

Les **effets de charges** sont des phénomènes géophysiques présentant des variations inter-annuelles comme les redistributions de masse dans l'atmosphère ou l'hydrosphère (neige, humidité dans les sols, nappes phréatiques...). En effet, tous ces phénomènes induisent des déformations de la croûte terrestre plus ou moins importantes mais souvent de l'ordre de 1 cm ou plus crête à crête. L'évolution géodésique des modèles géophysiques a été étudiée par [Barreda et Rodriguez, 2000] et une modélisation de ces effets a alors été réalisée.

L'effet de **charge atmosphérique** sur la surface des océans n'induit aucune déformation (les océans réagissent probablement comme un baromètre inverse aux échelles de temps considérées dans cette étude). Toutes les analyses reposent sur l'hypothèse de la réponse de baromètre inverse des océans aux changements de pression atmosphérique, cette hypothèse étant certainement correcte pour des périodes

¹ Moyen utilisé pour atténuer l'effet de stations fournissant des observations de moins bonne qualité. Mais le problème est de disposer d'un système de pondération correct et à jour par rapport aux évolutions technologiques.

suffisamment longues (en tout cas supérieures à 3-4 jours). Cependant, cet effet crée une déformation de toute la croûte terrestre sur les continents. L'interprétation et la modélisation des mouvements verticaux est complexe en raison de la réponse viscoélastique de la Terre à un effet de charge, réponse variable d'un point à un autre de la surface continentale. Les effets de la charge atmosphérique sont estimés à partir des cartes de champ de pression moyen publiées par l'ECMWF toutes les 6 heures.

Une autre origine de déplacements verticaux est liée aux **marées terrestres**. La force de marées terrestres provient de la différence entre la force d'attraction luni-solaire en un point de la Terre et celle exercée au centre des masses de la Terre. Cette force provoque des perturbations locales et globales, dépendant de la viscoélasticité de la Terre. Ces marées ont été calculées à partir du potentiel gravitationnel luni-solaire. La modélisation des marées terrestres a été améliorée par [Barreda et Rodriguez, 2000] ; des écarts de quelques millimètres par rapport à l'ancienne modélisation ont été rajoutés.

Enfin, le déplacement de l'axe de rotation à la surface de la Terre induit un effet équivalent à une marée, la **marée polaire**. Celle-ci, non prise en compte jusqu'à présent dans nos ajustements géométriques de coordonnées, peut induire des déplacements des stations de plusieurs millimètres. Une modélisation a donc également été réalisée.

La déformation totale résultant de la somme des effets nouvellement modélisés (marées terrestres (MT), marée polaire (MP) et effets de charge atmosphérique (Atm)) est indiquée sur la Figure 3.13 pour les stations de Grasse, Graz et Herstmonceux. Par comparaison, les variations d'altitude déterminées à partir des observations des satellites LAGEOS -1 et -2 des trois stations laser correspondantes sont également indiquées.

Ces résultats sont extrêmement encourageants. L'accord est moins bon pour la station de Grasse, notamment pour l'année 1997 pour la raison déjà indiquée précédemment (modification technique). En faisant abstraction du début de l'année 1997 et du décalage systématique entre les variations d'altitude modélisées et les séries laser, ces résultats sont tout à fait satisfaisants.

Il reste cependant à prendre en compte les effets de charge océanique qui correspondent à la réponse des plateaux continentaux sous l'effet des marées océaniques, effets pouvant se répercuter jusqu'à des centaines de kilomètres à l'intérieur des terres, mais très faibles au plateau de Calern.

Les différents effets étudiés sont donc loin d'être négligeables (au niveau de plusieurs millimètres) et leur somme peut atteindre le niveau centimétrique. Cela nous éclaire sur les variations inter-annuelles observées par la télémétrie laser.

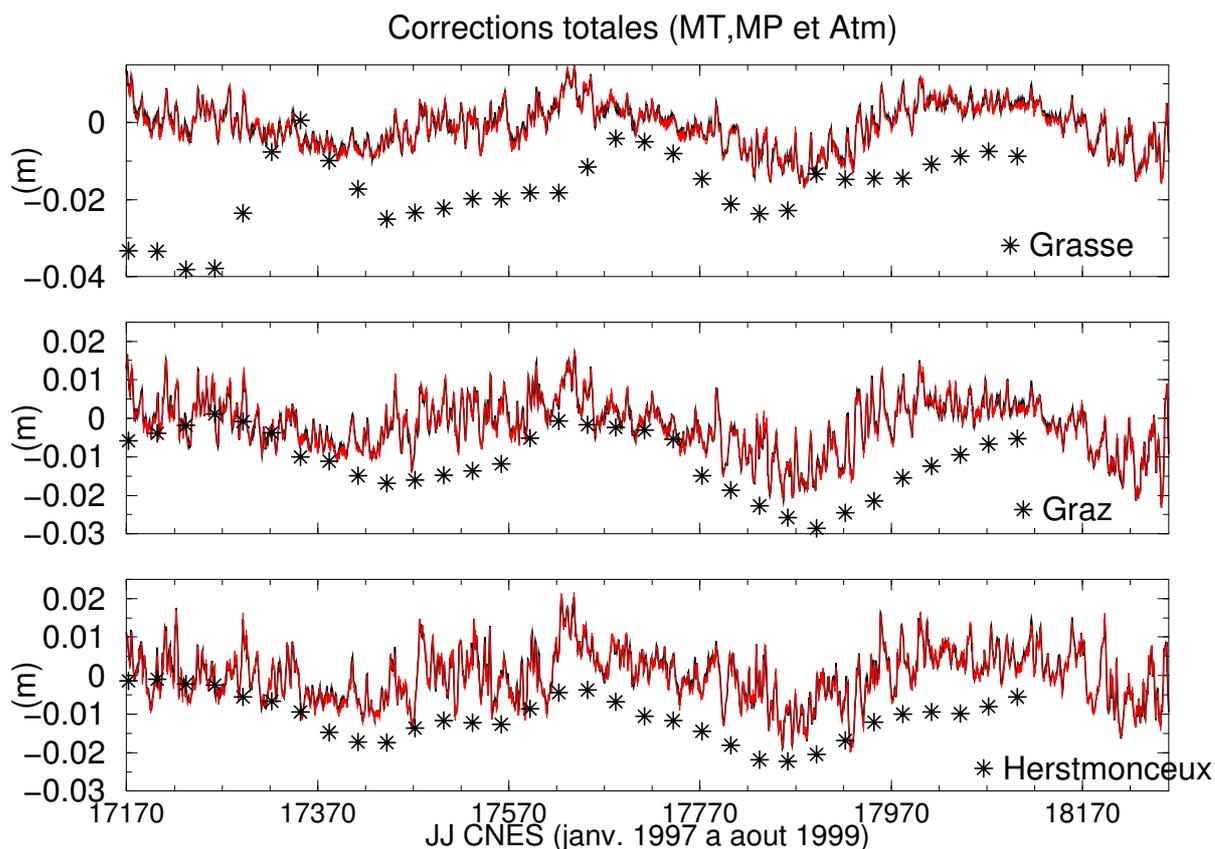


Figure 3.13 : Comparaison de la déformation totale de la composante verticale (en m) modélisée (ligne continue) et du positionnement laser (étoiles). La modélisation correspond à l'addition des effets de marées terrestre (MT), de marée polaire (MP) et de charge atmosphérique (Atm).

6. Conclusion

Nous avons réalisé une campagne unique de co-localisation au plateau de Calern avec les stations laser satellites et laser Lune, le récepteur GPS permanent et le gravimètre absolu. Le rôle de la station laser Lune pendant cette campagne a été très important, en apportant, avec les données sur les satellites LAGEOS -1 et -2, une solution totalement indépendante. La qualité des données de cette station est prépondérante dans la recherche de signaux géophysiques (déplacement verticaux) et dans l'évaluation de la qualité instrumentale des stations laser du plateau de Calern.

Le contrôle de la qualité des données laser, chose essentielle à effectuer pour ce type de mesures, a abouti à des améliorations techniques, d'orbitographie et de positionnement. Par exemple, la grande stabilité du biais de la station laser Lune (± 1 mm) ainsi qu'un biais moyen très proche de zéro ont été mis en évidence. Les progrès réalisés depuis 1997 par la station laser satellites fixe, notamment grâce à l'installation d'un photodétecteur de type C-SPAD, sont également apparus clairement. En effet, le biais est bien plus faible (quelques millimètres au lieu de 3-4 cm avec l'ancien photomultiplicateur) et sa stabilité excellente ($\pm 0,7$ mm en 1998 par exemple).

Les résultats de cette analyse, importants pour l'avenir et pour les études de phénomènes de variations à long terme ainsi que pour la validation des orbites et l'étalonnage des altimètres embarqués, peuvent être résumés comme suit :

- le rattachement géodésique local entre les deux stations laser satellites et laser Lune se situe à mieux que 5 mm,
- l'existence d'un signal géophysique annuel et inter-annuel d'amplitude centimétrique sur la composante verticale des coordonnées de stations a été mise en évidence,
- la cohérence avec la gravimétrie absolue (diminution de g en fin d'été simultanée à une élévation des stations laser du plateau de Calern) est notable,
- le positionnement issu des mesures du récepteur GPS permanent est en partie bien corrélé avec les coordonnées laser, mais parfois les différences sont significatives,
- la cohérence des signaux saisonniers au niveau des stations laser européennes et l'existence de variations de positionnement de même signature au niveau mondial confirment qu'il s'agit d'effets géophysiques à grande échelle (marées terrestres et polaire) avec des fluctuations régionales d'amplitude (effets de charges),
- des erreurs systématiques du positionnement par rapport aux coordonnées de l'ITRF97 ont été mises en évidence.

Dans cette étude, les effets de variations verticales ont été essentiellement vus comme des effets de charge dus à l'atmosphère. En effet, les données du gravimètre absolu portable et une étude géodynamique du plateau de Calern nous ont éclairés quant à la faiblesse relative des effets géodynamiques locaux par rapport aux effets de charge dus à l'atmosphère.

Au niveau hydrologique, les études menées au CERGA en collaboration avec des géophysiciens montrent que les variations de g dues à des variations de quantité d'eau dans les sous-sols sont négligeables. Les effets de marées océaniques seront mis en place dans les calculs de positions de stations, mais pour le moment ils sont supposés de moyenne nulle sur les périodes temporelles considérées (ceci doit être vrai à environ 1-2 mm).

Ces résultats confirment que dorénavant dans toutes les déterminations d'orbite et de positionnement, il faut tenir compte de tels phénomènes géophysiques agissant sur les coordonnées des stations et donc utiliser les modèles développés avec succès par [Barreda et Rodriguez, 2000].

Cette méthode d'analyse nous a permis de réaliser un filtrage des mesures. L'accord des résultats obtenus pour le plateau de Calern, pour Graz et Herstmonceux provient de la cohérence des champs de pression de surface à l'échelle de l'Europe (quelques milliers de kilomètres) et donc de la cohérence spatiale des effets de charge. Cependant, certaines différences existent en raison des différences de situation géographique : continentale pour Graz, côtière pour Herstmonceux et intermédiaire à Grasse. De plus, toutes les autres stations considérées sont affectées d'effets saisonniers du même ordre de grandeur, même si la qualité des orbites (2 cm en théorie mais certainement plus proche de 1 cm en réalité) peut varier dans le temps et d'un point à l'autre de la Terre.

Etant donnée l'importance d'une telle étude (enjeux majeurs d'un positionnement absolu ou relatif avec une exactitude de l'ordre millimétrique), l'analyse est encore à approfondir.

L'étude systématique des passages strictement communs entre plusieurs stations serait indispensable afin de mieux comprendre les mécanismes mis en jeu. L'analyse des passages communs à Grasse donnera des informations à la fois sur le signal géodésique et sur le comportement instrumental de chaque station. Ainsi par exemple, on pourra déterminer s'il existe ou non un biais commun aux différentes stations ou un biais instrumental différentiel.

Pour ajuster le positionnement des stations laser du plateau de Calern, on pourrait également ramener les observations des stations laser en un même point. L'excentricité entre les deux est très bien déterminée et l'erreur commise sur l'altitude, si on ramène les observations de la station laser Lune à la station laser satellites sans tenir compte de la distance entre les deux stations, devrait être de l'ordre du millimètre compte tenu de l'altitude des satellites considérés.

La réalisation de corrélations croisées des résidus laser de différentes satellites (LAGEOS -1 et -2, T/P...) aux mêmes périodes a été initiée par P. Bonnefond et P. Exertier (2000). En effet, un biais instrumental se traduit par une corrélation entre les résidus de satellites différents (orbites, formes...) puisqu'il n'existe aucun autre paramètre commun entre les observations que la station laser elle-même. C'est dans cet objectif que les arcs d'orbites de LAGEOS ont été calculés en phase avec les cycles de T/P. Ainsi, on dispose d'un autre type de contrôle de la qualité des mesures laser au niveau de l'instrumentation. Mais dans cette comparaison, il ne faudra pas oublier les différences dues aux rétroreflecteurs et aux différences d'altitude des satellites (par exemple 6 000 km pour LAGEOS et 1 330 km pour T/P).

Ainsi, on dispose dorénavant d'une méthode d'analyse permettant de déterminer rapidement (à partir du moment où l'on dispose de suffisamment de données) l'exactitude des observations d'une station laser, méthode qui sera utile pour évaluer les nouvelles performances de la station mobile sur le terrain après toutes les améliorations qui lui ont été apportées. Cette méthode développée pour les satellites LAGEOS peut aussi être appliquée à d'autres satellites plus bas comme STELLA et STARLETTE ayant un nombre de passages plus important pour une même durée d'expérience de co-localisation. Dans ce cas, la station laser Lune ne pourrait pas participer puisqu'elle ne peut pas poursuivre des satellites plus bas que LAGEOS. On pourra également réaliser des séries temporelles de coordonnées en déterminant le positionnement des stations à partir des orbites de ces satellites bas, ce qui est tout à fait envisageable compte tenu des énormes progrès qui ont été réalisés ces dernières années dans l'orbitographie des satellites STELLA et STARLETTE.

Enfin, il est indispensable de continuer les mesures de gravimétrie absolue afin de confirmer que les variations saisonnières de g sont en accord avec les variations d'altitude déterminées à partir des observations laser. Un point au moins tous les 3 mois serait idéal. Des durées plus longues d'observations et des points de mesures environnants situés à des altitudes différentes (comme sur le site de Nice à 300 m d'altitude) sont donc envisagées afin de compléter cette étude.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

A l'issue de mon travail de thèse, les principaux résultats obtenus peuvent être résumés comme suit.

Tout d'abord, sur le plan technique, l'analyse de la situation de la Station Laser Ultra Mobile a conduit à un certain nombre de modifications instrumentales qui ont été largement décrites dans le second chapitre de ce document. Elles concernent plus particulièrement :

- la longueur d'onde d'émission du laser,
- les changements du photodétecteur de retour et du système de détection de départ des impulsions laser,
- le mode d'étalonnage des mesures,
- la largeur des impulsions,
- la stabilité des éléments optiques du banc laser,
- la suppression de la transmission du passage des signaux de détection par les contacts tournants.

Toutes ces modifications et les arrangements techniques qui y sont liés sont actuellement en fin de phase d'intégration.

Après l'analyse théorique des différentes sources d'erreur des mesures laser, des tests ont été réalisés en laboratoire sur le photodétecteur de retour et sur le chronomètre afin de chiffrer leurs contributions au bilan d'erreur global. Des mesures, notamment sur la stabilité du laser, et un réglage de la C-SPAD avec le nouveau laser de la station restent encore à effectuer. Cependant, une estimation de l'exactitude des mesures de la FTLRS dans sa nouvelle configuration (environ 12 mm) permet d'être optimiste quant à la capacité de cette station à relever le défi de JASON-1. On sait également ce qu'il reste à faire pour atteindre des performances encore plus pointues et pour avoir une évaluation de l'exactitude réelle des observations.

A présent, il semble plus réaliste de parler d'environ 1 cm d'exactitude plutôt que d'une exactitude millimétrique comme envisagé au début de ma thèse. A ce stade, les facteurs les plus limitants dans la qualité des mesures de la FTLRS sont la chronométrie (d'où l'idée de remplacer à long terme le chronomètre par des dateurs d'événements) et les problèmes de signature de satellite à mieux prendre en compte puisqu'ils sont amplifiés par le photodétecteur de retour. Le bilan d'erreur a été vérifié, mais l'exactitude réelle des mesures ne pourra être estimée qu'à partir d'observations obtenues sur satellites. Le niveau de qualité, les biais et la stabilité des observations de la station seront alors confirmés par des analyses de mesures similaires à celle exposée dans le troisième chapitre de ce document.

Une analyse scientifique a permis de mettre en évidence un signal géophysique annuel et inter-annuel au niveau local et mondial dans le positionnement des stations laser, et plus particulièrement sur la composante verticale avec une amplitude d'environ 2 cm crête à crête. Il s'interprète par une combinaison des marées terrestres et polaire et des effets de charge atmosphérique et océanique qui étaient jusque-là non ou mal modélisés. Il est fondamental de prendre en compte ces variations dans le cadre de validation des orbites et d'étalonnage des satellites altimétriques comme JASON-1. Dans le cas contraire, on ne pourrait satisfaire les objectifs de cette mission puisque les amplitudes dépasseraient le centimètre et puisque cela fausserait l'orbite à un niveau variable (pouvant dépasser quelques millimètres) et donc l'étalonnage. Les résultats de cette analyse ont également des impacts très importants concernant la validation des orbites et l'étalonnage des radars altimétriques embarqués. A l'issue de cette étude, on peut disposer d'un positionnement géocentrique précis et donc de mesures de distance les plus exactes possibles. Pour cet aspect, étant donnée l'amplitude des variations d'altitude

observées (environ 2 cm), il sera indispensable de prendre en compte les signaux saisonniers dans l'utilisation des mesures d'altitude et donc pour l'orbitographie des satellites océanographiques et pour leur étalonnage. Cependant, pour la campagne de validation et d'étalonnage de JASON-1, on utilisera la même modélisation que pour l'analyse des données de T/P (celle avant cette étude) afin de pouvoir comparer les résultats des deux satellites. Ensuite, lorsqu'on disposera d'un nouveau modèle standard, on pourra l'utiliser.

Finalement, de telles études ont donné une grande confiance dans les résultats obtenus ont permis de parler d'une exactitude certainement proche du centimètre. On a pu aussi identifier les sources d'erreurs avec leur ordre d'importance et des mesures seront réalisées dans cette optique.

A l'issue de cette thèse, on a donc la capacité de détecter des biais instrumentaux à court terme et on dispose d'une méthode permettant de déterminer des biais à long terme à partir de l'analyse des résidus laser. Ce travail de thèse montre aussi qu'au niveau des performances recherchées, les problèmes instrumentaux, le rattachement (point de référence...), l'électronique des systèmes d'acquisition des données deviennent finalement aussi importants dans le bilan d'erreur du positionnement que la physique du signal (atmosphère, déformations de la croûte terrestre).

De nombreuses perspectives à court et moyen termes peuvent être mentionnées.

Tout d'abord, une triple expérience de co-localisation, basée sur les observations des satellites LAGEOS sera menée dès que possible par les trois stations laser du plateau de Calern : la station laser satellites fixe, la station laser Lune et la Station Laser Ultra Mobile.

Puis, les nouvelles performances de la FTLRS ainsi vérifiées, une campagne de validation des orbites et d'étalonnage de l'altimètre de JASON-1 est programmée en Corse (été 2001). Elle devrait débiter peu avant le lancement du satellite puis se poursuivre durant plusieurs mois. Au cours de cette campagne plusieurs techniques seront donc en co-localisation : FTLRS, GPS, marégraphe, gravimétrie, radiomètre à vapeur d'eau et si possible DORIS. Cette campagne sera naturellement suivie par des expériences similaires pour le satellite ENVISAT en Corse et à plus long terme sur l'île de Gavdos en Crète ou à Ibiza, voire même à Tahiti.

A titre d'exemple, il pourrait également être envisagé de participer à la mesure de l'effet de charge océanique en des sites sensibles comme Brest (effet différentiel entre Brest et Le Mans supérieur à 10 cm au cours des marées d'équinoxe). Cependant, il faudra disposer d'une méthode d'analyse permettant d'avoir un positionnement rapide et exact à partir d'une orbite locale.

Il est également prévu que la FTLRS participe aux expériences de Transfert de Temps par Lien Laser (T2L2).

D'autres campagnes de validation d'orbites et d'étalonnage de satellites altimétriques sont à prévoir étant donné les programmes de lancements de tels satellites sur les 10 ans à venir (JASON-2, ALTIKA, GAMBLE). Des expériences de co-localisation avec d'autres stations laser pourraient aussi être envisagées afin de qualifier certaines nouvelles stations laser ou déterminer les biais instrumentaux de stations présentant des mesures douteuses.

La décorrélation des stabilités instrumentale et orbitale pourrait être réalisée à partir de l'analyse des observations des satellites STELLA et STARLETTE ayant des altitudes plus basses, dès lors que l'on disposera d'une orbitographie de qualité suffisante liée à une meilleure connaissance du champ de gravité grâce aux observations du satellite CHAMP. Il faudrait également poursuivre la comparaison des séries temporelles laser avec le positionnement du récepteur GPS. Un autre point concerne l'utilisation des données laser brutes (full-rate) dans l'analyse, rarement utilisées en géodésie, données contenant des informations de valeurs pouvant être très utiles dans les études d'interprétation de la dispersion des mesures et plus particulièrement pour la détermination des signatures de satellites.

Quelques remarques générales concernant la technique de la télémétrie laser peuvent être faites. Un réseau de qualité doit être maintenu, la qualité des stations d'observations étant primordiale. On peut indiquer l'installation très récente d'une station laser (MOBLAS6) en Afrique du Sud, ce qui sera un excellent atout dans la détermination des orbites.

La difficulté de la télémétrie laser étant étroitement liée à ses besoins en personnel (entretien et observations), l'automatisation est une voie nécessaire de développement afin de disposer de systèmes fiables et moins coûteux. Un autre aspect concerne le développement et l'emploi de lasers hautes cadences ou sans danger pour les yeux, permettant des opérations plus sécurisées. A ce niveau, on peut citer les projets T2000 et SLR2000 qui répondent à ce genre de besoins. Les progrès permettant l'amélioration de l'exactitude des mesures laser comprennent :

- l'utilisation de techniques à plusieurs longueurs d'onde afin d'éliminer la source d'erreur liée à la correction de propagation dans l'atmosphère. Ces mesures permettront d'améliorer les modèles utilisés comme celui de Marini-Murray ou d'autres plus précis,
- des systèmes de chronométrie améliorés à la fois en termes de stabilité et de précision,
- des cibles satellitaires améliorées, notamment au niveau du type des rétroreflecteurs et de leur disposition sur le satellite ainsi qu'une amélioration des modèles de signature des satellites existants,
- le développement et l'intégration de laser ayant des impulsions plus courtes.

Au niveau spatial, il est également prévu d'installer des rétroreflecteurs laser si possible sur tous les objets envoyés dans l'espace en orbite autour de la Terre, y compris par exemple les 3^{èmes} étages de fusées. Ainsi, un suivi orbital des plus gros débris spatiaux, de satellites géostationnaires ou des constellations de satellites comme SKYBRIDGE, pourra être réalisé par les stations de télémétrie laser, notamment dans des moments précis et critiques comme le changement d'orbite en fin de vie pour ne pas polluer l'espace utile.

De nouvelles applications de la technique de la télémétrie laser émergent également en étendant la portée des mesures au delà de la Lune jusqu'aux planètes telluriques du Système Solaire. Dans le futur, la télémétrie laser monodirectionnelle avec des systèmes actifs (transpondeurs) ou passifs (horloges) placés sur les surfaces planétaires ou embarqués à bord de sondes en orbite solaire, offre des perspectives scientifiques extraordinaires pour les études de rotation planétaire et dynamique (précession, mouvement du pôle, longueur du jour), éphémérides d'orbites planétaires améliorées, dynamique du Système Solaire, relativité générale et interactions entre atmosphère planétaire et corps solide. La première planète accessible pourrait être Mars.

Finalement, la télémétrie laser est à rapprocher des techniques d'altimétrie laser fonctionnant avec une diode laser embarquée. Les mesures altimétriques sont alors basées sur la mesure du temps de vol des impulsions laser réfléchies par la surface dont on veut déterminer l'altitude. A ce propos, on peut indiquer le réel succès¹ de l'expérience MOLA embarquée à bord de la sonde *Mars Global Surveyor* (MGS) ou le projet ICESAT (satellite d'altimétrie sur les glaces de la Terre). Concernant ce dernier satellite, une proposition a été faite pour l'utilisation de la FTLRS pour l'étalonnage de son altimètre. Dorénavant, toutes les missions d'exploration planétaire pourraient être équipées d'un altimètre laser, moins encombrant et donnant des résultats plus précis pour les sols planétaires (spot lumineux plus fin donnant accès à plus de détails) qu'un altimètre radar classique.

¹ Altitude déterminée au niveau de quelques centimètres à comparer à la dizaine de mètres obtenus par les sondes Viking.

ANNEXES

ANNEXE A

DESCRIPTION SUCCINCTE DES DIFFERENTES TECHNIQUES DE GEODESIE SPATIALE

Cette annexe résume les différences principales entre les techniques VLBI, GPS, GLONASS, DORIS et PRARE par rapport à la télémétrie laser.

1. Interférométrie VLBI

L'interférométrie radio à très longue base, ou VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*), consiste à recevoir le signal émis par une même radiosource en deux stations, ou plus, constituant les extrémités de la base de l'interféromètre (le plus souvent à l'échelle intercontinentale). Les radiotélescopes sont très grands (10 à 70 m de diamètre) et le réseau d'antennes est assez dense. Cette technique offre l'avantage d'avoir un fonctionnement tous temps.

Les observations VLBI ont permis la construction d'un repère céleste fondamental basé sur la position de quasars et de noyaux actifs de galaxies. Outre les applications astrométriques, la précision du positionnement des antennes VLBI à la surface de la Terre permet l'étude de la déformation de la croûte terrestre et la mesure de la rotation de la Terre.

Les performances de ce système au niveau de la mesure de la rotation de la Terre et du mouvement du pôle sont meilleures que le laser. Par contre, au niveau du positionnement, le référentiel ainsi obtenu n'est pas rattaché au centre des masses de la Terre, contrairement au laser.

Cette méthode purement géométrique (aucune orbite intermédiaire à calculer, aucune intervention du champ de gravité terrestre) est fondamentale en astrométrie puisqu'elle représente ce qu'il y a de plus précis et exact en termes de positionnement. Cependant, du point de vue technologique, les moyens à mettre en œuvre sont extrêmement lourds et coûteux.

Le VLBI géodésique fournit des vecteurs de base entre antennes à mieux qu'un centimètre près (bruit interne) quelles que soient les distances en jeu. L'évaluation de la position des stations VLBI à la surface de la Terre est donnée avec une précision de 3-5 mm et celle de leur vitesse à 1 mm/an près. L'orientation de la Terre dans l'espace est déterminée à 0,2 mas¹ pour le pôle terrestre, pour le temps universel UT1 et pour la précession-nutation [Feissel et al., 1995].

Au plateau de Calern, la dernière campagne de réalisation d'un point géodésique fondamental avec la technique VLBI remonte à 1989. Ce point est unique en France par la co-localisation de toutes les techniques actuelles de positionnement.

2. Mesures radioélectriques

Il existe différentes techniques radioélectriques de géodésie spatiale. Tout d'abord, il faut citer le système américain GPS et le système russe GLONASS, destinés à la navigation, qui s'appuient sur une constellation de satellites émetteurs et d'un réseau de stations réceptrices au sol. L'autre catégorie de système réalise des mesures de variations de distance par effet Doppler (émetteur au sol, récepteur embarqué sur le satellite) et vise plutôt les applications d'orbitographie de précision. C'est dans cette classe de techniques que se trouvent les systèmes français DORIS et allemand PRARE.

¹ mas pour millième de seconde de degré.

Ces méthodes radioélectriques offrent l'avantage d'avoir un appareillage au sol automatique et robuste, avec un fonctionnement tous temps. Ces techniques présentent cependant des difficultés communes liées à la définition du centre de phase de l'antenne émettrice et du récepteur, ainsi que la modélisation des erreurs dues à la propagation des ondes radio dans la troposphère et l'ionosphère. En effet, ces techniques ont l'inconvénient d'être bien plus sensibles aux effets de la propagation des ondes radio dans la troposphère (et surtout la composante humide) que les ondes lumineuses de la télémétrie laser. Une difficulté supplémentaire est également due à l'ionosphère qui n'affecte pas du tout les mesures laser. D'autre part, les systèmes GPS et GLONASS par exemple, ayant des biais instrumentaux constants (appelés ambiguïtés) et un système de codage des signaux, nécessitent de travailler en mode différentiel pour atteindre les niveaux de performances requis par les différentes études de géosciences associées. Ainsi, les mesures radioélectriques sont étalonnées et validées par d'autres méthodes indépendantes comme la télémétrie laser, pour permettre des rattachements intercontinentaux.

GPS

Le GPS (*Global Positioning System*) est un système de positionnement par satellite permettant de déterminer facilement la position et la vitesse du récepteur, à tout moment et en tout lieu du globe. Ce système tout temps fonctionne aussi bien en mode satellite-sol qu'en mode satellite-satellite, le récepteur pouvant être placé au sol ou embarqué sur un satellite. Une large gamme de matériel est actuellement disponible, pouvant fournir une précision s'échelonnant de la centaine de mètres à quelques millimètres, suivant le type de récepteur et la technique utilisés (notamment en temps réel ou différé).

La constellation du système GPS comprend 24 satellites en orbite quasi-circulaire à 20 200 km d'altitude, avec une période d'environ 12 heures. Les orbites sont telles que n'importe quel point de la Terre est en vue d'au moins 4 satellites simultanément [Bouin, 1999 ; GNSS, 1993 ; Suing, 1999].

Deux des satellites de la constellation GPS sont équipés de rétroreflecteurs laser afin d'étalonner leurs mesures par les observations de télémétrie laser, ce qui permet de valider la restitution d'orbite et donc à terme d'améliorer la performance du réseau GPS.

Les techniques différentielles sont utilisées pour atteindre l'exactitude requise pour les applications géodésiques, géodynamiques et géophysiques.

La technique GPS est excellente pour la densification de réseaux géodésiques (faible coût, facilité de mise en place et d'utilisation) et est couramment utilisée pour la détermination des mouvements de la croûte terrestre (précision horizontale de 3-5 mm). Elle est aussi souvent choisie pour les surveillances locales (observations à long terme de glissements de failles par exemple), en raison de la précision dans les mesures de phases et du faible coût des instruments. La solution globale des coordonnées des points GPS dans l'ITRF96 a une précision de 5-10 mm, selon les solutions [Sillard, 1999].

Le plateau de Calern est équipé d'une antenne GPS permanente depuis 1995 (point du réseau IGS). La présence permanente de ce système a renforcé le site par des études en géodynamique globale et régionale. Les mesures GPS sont utilisées pour l'étalonnage des satellites altimétriques en Corse. Le site d'Ajaccio est équipé d'une antenne GPS permanente depuis octobre 1999 et des mesures régulières du géoïde marin dans la zone d'étalonnage sont réalisées à Senetosa avec des bouées GPS [Bonfond, 2000].

Ainsi, le système GPS a démontré ses capacités à réaliser des mesures de la déformation crustale régionale d'une manière moins coûteuse et avec des précisions comparables, sinon meilleures, à celles de télémétrie laser et VLBI.

GLONASS

Tout comme GPS, le système russe de navigation par satellites GLONASS (*GLO*bal *N*avigation *S*atellite *S*ystem) est basé sur les techniques spatiales qui donnent accès à des renseignements à l'échelle mondiale, 24 heures par jour et quel que soit le temps, pour donner la position et la vitesse. Très voisin dans ses principes du système GPS, il n'est pas encore complet, tous les satellites ne fonctionnant pas. Entièrement déployée, la constellation GLONASS comporterait 24 satellites.

Les mesures GLONASS sont régulièrement étalonnées avec des mesures de télémétrie laser. En effet, chaque satellite GLONASS est spécialement équipé de rétro réflecteurs laser à cette fin.

Les premiers tests ont montré l'intérêt d'utiliser une localisation mixte GPS-GLONASS, tant pour des problèmes de navigation que pour des positionnements géodésiques de haute précision. En particulier, l'addition de la constellation, même incomplète, GLONASS à celle de GPS permet d'améliorer les performances du GPS seul en terme de fiabilité, de disponibilité et d'exactitude.

Une campagne d'observations IGEX-98 (*I*nternational *G*LONASS *E*xperiment-1998) permettant de mettre en place un réseau scientifique mondial d'observations¹ a été organisée entre le 19 octobre 1998 et le 19 avril 1999 [Willis et al., 1999]. Cette campagne a consisté à poursuivre les satellites GLONASS par les techniques radio et de télémétrie laser. L'archivage des mesures a été fait dans des centres de données globaux et l'analyse de celles-ci a été encouragée (calculs d'orbites précises, paramètres de rotation terrestre, corrections ionosphérique et troposphérique...). Cette campagne de six mois se prolonge maintenant par une phase de pré-service scientifique opérationnel à laquelle la station de télémétrie laser Lune du plateau de Calern participe largement. Les données de cette station ont également permis de réaliser une validation des orbites GLONASS [Barlier et al., 2000].

La campagne IGEX-98 a été un réel succès, mobilisant environ 70 récepteurs GLONASS (mixtes avec GPS ou en co-localisation avec des récepteurs GPS géodésiques). Plusieurs des sites choisis sont importants pour la géodésie et pour l'IERS. Le plateau de Calern a d'ailleurs fortement contribué à cette campagne grâce aux mesures de la station de télémétrie laser Lune, au récepteur GPS permanent et, dans un premier temps, au récepteur GLONASS monofréquence puis avec l'installation d'un récepteur bifréquence permanent. Les résultats indiquent que tous les groupes d'analyse concernés ont obtenu des orbites précises (certaines de l'ordre de 10 à 20 cm pour la composante radiale), montrant ainsi les potentialités du système GLONASS, soit seul, soit en complément avec GPS. Cette qualité d'orbite permet d'obtenir dès à présent et sans attendre la constellation complète, des répétitivités géodésiques sub-centimétriques obtenues avec une journée de mesures.

DORIS

Le système DORIS (Détermination d'Orbite et Radiopositionnement Intégré sur Satellite ou *Doppler Orbit Determination and Radiopositionning Integrated by Satellite*) est un système français d'orbitographie et de navigation précises. Ce système a été embarqué sur les satellites SPOT et sur le satellite océanographique TOPEX/POSEIDON et sera prochainement embarqué sur les satellites JASON-1 et ENVISAT. Il permet aussi des applications au positionnement précis ainsi que la détermination de la rotation de la Terre. Il constitue ainsi une excellente technique pour la réalisation en continu du réseau de référence terrestre.

DORIS fournit des mesures, depuis un récepteur embarqué, du décalage Doppler des signaux radio transmis par le réseau de stations émettrices au sol [Bouillé, 2000].

¹ Condition nécessaire pour l'obtention d'orbites précises des satellites GLONASS indispensables à l'utilisation scientifique de ce système.

Le réseau de balises est extrêmement homogène et offre une parfaite couverture du globe, ce qui est très important pour l'obtention d'un système de référence et des coordonnées du pôle. Cette remarquable couverture mondiale du segment terrestre est une des forces du système DORIS.

DORIS est donc un système centralisé, mais il a l'inconvénient d'être saturable pour la localisation et son utilisation est soumise à une autorisation préalable.

Le système DORIS participe depuis 1996 à l'élaboration du système international des références terrestres ITRF, au même titre que les mesures VLBI, laser et GPS. Le sous-produit de l'orbite est un repère de référence terrestre de grande qualité, en particulier du fait de l'excellente distribution du réseau de poursuite, point fort de ce système par rapport aux autres techniques de géodésie spatiale [Sillard, 1999]. Les données DORIS sont donc utiles dans les études de géodésie et de la Terre solide (géoïde, positionnement, tectonique, mouvements du pôle...).

DORIS est un système de très grande précision (1 à 3 cm pour le positionnement) et on peut raisonnablement espérer encore mieux lorsque de nouveaux satellites porteurs seront en orbite, la précision des mesures étant proportionnelle au nombre de satellites en vol [Crétaux, 1999a].

La solution de coordonnées des balises DORIS du repère de référence terrestre ITRF96 a une précision moyenne de 26 mm en utilisant 3 satellites. La précision des vitesses est de 3-4 mm/an avec des systématismes faibles par rapport à GPS et au laser respectivement de l'ordre de 2 et 4 mm/an [Boucher et al., 1998]. Ce système est intéressant dans la durée puisqu'il permet de déterminer les mouvements horizontaux avec une précision d'environ 1 mm/an au bout de 4 à 6 ans d'observations. On peut aussi mettre en évidence les mouvements verticaux dont l'amplitude est environ un dixième de celle des mouvements horizontaux [Crétaux, 1999b].

Les deux dernières campagnes d'observation avec une balise DORIS au plateau de Calern remontent à 1992 et 1996.

PRARE

Le système d'orbitographie précise allemand PRARE (*Precise Range and Range-rate Equipment*), n'est actuellement opérationnel que sur le satellite altimétrique ERS-2 (1995). Initialement, l'objectif était de réaliser un système capable de mesurer continûment et automatiquement des distances très précises (distances radiales) et des vitesses relatives entre l'espace et le sol en même temps et de manière totalement synchrone. Le réseau terrestre initial comptait 29 stations permanentes, entièrement automatiques et autonomes. Celles-ci ont été installées le plus souvent en co-localisation avec des stations VLBI, laser, GPS ou DORIS. Aujourd'hui cependant, la maintenance des stations au sol et leur entretien ne sont plus assurés. Le système PRARE est régulièrement étalonné par des mesures de télémétrie laser effectuées par la station de Postdam (Allemagne) près de laquelle se trouve une antenne PRARE. L'exactitude moyenne des mesures actuelles est de 2,5 à 6,5 cm pour la distance et 0,1 mm/s pour la vitesse [Flechtner, 2000].

ANNEXE B

QUELQUES EXEMPLES D'AUTRES STATIONS LASER DANS LE MONDE

1. MLRO

MLRO (*Matera Laser Ranging Observatory*) est une station italienne récente de télémétrie laser fonctionnant en modes une et deux couleurs. Cette station, en fin de développement, n'est pas encore tout à fait opérationnelle. Les sous-systèmes et composants de cette station ont été soigneusement choisis pour exploiter au mieux les technologies actuellement disponibles.

Cette station a des capacités d'observation de jour comme de nuit de satellites artificiels bas (vers 400 km d'altitude) jusqu'à la Lune. Elle utilise un télescope Cassegrain de 1,5 m de diamètre et un système de pointage ayant une exactitude d'environ 1''. Cette station de télémétrie est adaptée à la technique multicolore. L'étalonnage de la station peut se réaliser à la fois avec des cibles internes et externes. Un système de détection radar d'avion a également été ajouté pour des considérations de sécurité. Le laser utilisé est un laser Nd:YAG produisant des impulsions de 40 ps de largeur avec un taux de répétition de 10 Hz. Les longueurs d'onde utilisées sont 532 nm en mode monochrome à laquelle on ajoute 355 nm en mode deux couleurs. L'énergie par impulsion est de 100 mJ dans le premier cas et de 50 mJ à 532 nm et 30 mJ à 355 nm dans le second cas. Cette station emploie des dateurs d'événements permettant une précision meilleure que 10 ps soit 1,5 mm sur la distance mesurée. Elle a la capacité de poursuivre plusieurs satellites ayant des passages entrelacés¹ et présente un haut degré d'automatisation et de fonctionnement assisté par ordinateur. Enfin, elle dispose également d'une capacité de diagnostic et de simulation pour vérifier les performances du système.

Des premiers tests réalisés en 1998 ont donné un écart-type inférieur à 2 mm sur cibles et de l'ordre de 4-5 mm sur satellite, la différence étant probablement liée à la signature du satellite.

Le lecteur intéressé est invité à se référer à [Bianco et al., 1998] et [MLRO, 1999].

2. TIGO

TIGO (*Transportable Integrated Geodetic Observatory*) est une station allemande conçue en tant qu'observatoire géodésique transportable et disposant de toutes les techniques de géodésie spatiale appropriées pour une station fondamentale. La capacité de transport de l'observatoire permet de combler des lacunes dans le réseau international et d'optimiser la contribution aux repères de référence globaux. Ce projet date de 1992 et la première campagne sur le terrain débutera en 2001.

Cette station est destinée à mener des campagnes d'observations pour des périodes minimales de 2-3 ans par site, une préférence étant donnée pour les sites de l'hémisphère Sud, ce qui se comprend aisément étant donnée la distribution insuffisante et asymétrique des stations laser. Cet observatoire géodésique à part entière comprend non seulement une station de télémétrie laser mais aussi une antenne VLBI et un récepteur GPS. Ces observations de géodésie spatiale sont complétées par des mesures in situ de gravité, de sismologie, de météorologie (température, pression, taux d'humidité). Elle dispose également d'un radiomètre à vapeur d'eau et d'un service temps-fréquence. Des mesures terrestres supplémentaires sont aussi réalisées, notamment dans le but de relier les observations VLBI et laser et de s'assurer de la stabilité du site.

TIGO a ses propres générateurs d'énergie électrique, en cas d'instabilité ou d'indisponibilité de source d'alimentation sur le site d'observation. Le système TIGO est regroupé dans 6 containers d'une douzaine de mètres de longueur, certifiés pour le transport maritime (voir Figure B.1). D'après le

¹ Satellites passant en même temps au-dessus d'une même station d'observations.

concept et les spécifications de TIGO, ce système peut être expédié dans tout environnement éloigné dans le monde, excepté en Arctique et en Antarctique. Après son installation, qui en principe n'excède pas quelques jours, certains containers de TIGO servent de salles d'opération.



Figure B.1 : TIGO durant les tests à Wettzell (Allemagne) en 1998. Le container de gauche correspond au module de télémétrie laser et à son télescope. Les deux autres contiennent l'alimentation électrique produite à partir d'énergie solaire en tant que source ininterrompue, les capteurs météorologiques, les horloges atomiques et les étalons de fréquence, l'ordinateur et les équipements de transmission des données. Le module VLBI et son antenne radio pliable sont situés sur le côté droit.



Figure B.2 : Ensemble de télémétrie laser de TIGO.

L'antenne VLBI de 6 m de diamètre peut être transportée en deux containers. Deux personnes suffisent pour installer, sans grue, la globalité du module VLBI en une semaine.

Le module de télémétrie laser (voir Figure B.2) se compose d'un seul container dans lequel le télescope et le matériel nécessaire sont stockés pendant le transport. Une fois sur le site d'observations, le télescope de 50 cm de diamètre monté sur un chariot peut être placé avec précision au-dessus du point de référence. Les éléments constitutifs du laser et le système de détection sont placés dans un environnement de salle blanche. Le système laser est spécifié pour poursuivre des satellites tournant autour de la Terre à environ 300 km d'altitude jusqu'aux satellites géostationnaires à environ 36 000 km d'altitude. L'espace libéré par le déplacement du télescope à l'extérieur est transformé en salle d'opération où les mesures laser sont effectuées. Le pointage se fait à mieux que 2''. Le système laser produit deux longueurs d'onde (847 nm dans l'infrarouge et 423,5 nm en bleu) basées sur un cristal Titane-Saphir (Cr :LiSAF) amplifié par un laser Nd:YAG. Les impulsions émises avec un taux de répétition de 10 Hz ont une largeur de 80 ps et une énergie de 30 mJ à chaque longueur d'onde.

Pour des questions de sécurité aérienne, un radar Doppler a été ajouté au module de télémétrie laser afin que le laser soit arrêté dès qu'un avion est détecté non loin du faisceau laser.

Le lecteur intéressé pourra trouver des informations complémentaires en consultant les articles [Sperber et al., 1996] et [Schlüter et al., 1999].

3. SLR2000

SLR2000 est un projet américain correspondant à une station de télémétrie laser entièrement autonome, à savoir totalement automatique et ne nécessitant pas de présence humaine. Elle utilisera un laser de très faible puissance non dangereux pour les yeux et la précision des observations tir à tir devrait atteindre un niveau de 1 cm ou mieux. Ce système poursuivra en continu (24h/24) les satellites artificiels jusqu'à une altitude de l'ordre de 20 000 km. Les coûts de reproduction sont espérés dix fois moins élevés que ceux des systèmes opérationnels actuels ; ceux de fonctionnement et de maintenance devraient être 75% moins chers que ceux nécessitant la présence d'opérateurs en permanence. Le temps moyen entre deux pannes est supposé être supérieur à quatre mois.

La station SLR2000 est composée des sous-systèmes principaux suivants :

- l'unité de référence temps-fréquence réalisée par un oscillateur rubidium asservi sur GPS en temps réel,
- l'émetteur et le récepteur optique constitués par un télescope,
- le système de poursuite ayant une précision de pointage au niveau de la seconde d'arc,
- le système de détection,
- le bâtiment climatisé dont les dimensions correspondent environ à un cube de 4 m de côté dans lequel tous les instruments sont placés, excepté le télescope qui se trouve dans une coupole de 3 m de diamètre située sur le dessus,
- la station météorologique,
- le système de contrôle.

Le concept initial du système SLR2000 a été développé en 1994 et la réalisation de la première station de ce type est encore en cours. Ce projet a conduit au développement d'un système de détection très rapide et sensible disposé en quadrant, d'un émetteur laser miniaturisé de puissance modérée, d'une station météorologique de qualité et d'un dateur d'événement rapide et de haute résolution, sans compter la construction des autres éléments constitutifs. Il est envisagé de mener les premiers tests sur le terrain courant 2001.

Le laser employé émet des impulsions dans le visible à une longueur d'onde de 532 nm avec un taux de répétition de 2 kHz. Ce laser produit des impulsions d'une largeur maximale de 150 ps ayant

une énergie d'environ 130 μJ au niveau de la sortie du télescope. Cela correspond au maximum de densité d'énergie toléré pour être sans danger pour l'œil humain, avec une telle cadence et un système d'émission-réception de 40 cm de diamètre (d'après les normes américaines de sécurité des yeux pour un laser à blocage de mode). La puissance moyenne au niveau du télescope est de 260 mW et la puissance crête est de l'ordre de 10^6 W, valeur très faible si on la compare aux puissances habituellement émises par les stations de télémétrie laser qui sont plutôt de l'ordre du gigawatt.

Le système de détection est basé sur l'utilisation simultanée de quatre photomultiplicateurs à galettes de microcanaux ou MCP (*Microchannel Plate Detector*) disposés en quadrant. Ceci permet de combiner un temps de transit rapide pour une détection précise et une correction du pointage à un niveau inférieur à la seconde d'arc en mode de comptage de photons. La disposition en quadrant permet de séparer le bruit des détections des photons provenant des cibles en vérifiant que le signal arrive simultanément sur les quatre détecteurs. Ce point constitue une des grandes originalités de cette station.

L'émission du faisceau laser et la réception des photons se fait avec un télescope parabolique de 40 cm de diamètre. Le système de pointage a une vitesse de rotation de $30^\circ/\text{s}$ en azimut et $20^\circ/\text{s}$ en hauteur et permet une poursuite ayant une précision au niveau de la seconde d'arc.

La station météorologique permet de mesurer la pression, la température, l'humidité relative, la vitesse et la direction du vent, la visibilité au sol, le type et la quantité cumulée de précipitations ainsi que la couverture nuageuse de tout le ciel, de jour comme de nuit.

Les détails de ce projet sont présentés dans [Degnan et al., 1996], [Degnan et Garry, 1997] et son avancement dans [Degnan, 1998a].

ANNEXE C

LE GRAVIMETRE ABSOLU PORTABLE FG5

La gravité est restituée par analyse de la trajectoire d'un petit rétro réflecteur laser en chute libre dont la distance est mesurée par interférométrie laser. Les mesures de temps précises sont possibles grâce à la présence d'un oscillateur rubidium.



Les avantages d'un tel instrument peuvent être résumés comme suit : il s'agit d'un instrument portable, absolu et de précision ($\sim 1 \mu\text{gal}$). L'exactitude de ses mesures est d'environ $1-2 \mu\text{Gal}$.

Mais comme tout instrument, ce gravimètre présente quelques faiblesses, à savoir une certaine lourdeur de mise en œuvre des mesures, la discontinuité des mesures (périodes inférieures à 10 jours). Des problèmes éventuels de stabilité d'horloge ont également été rencontrés.

Quelques corrections doivent être apportées aux mesures du gravimètre avant toute analyse. Tout d'abord au niveau instrumental, il faut tenir compte du temps de propagation de la lumière, du gradient vertical de gravité et du transfert au sol de la mesure. Puis, au niveau géophysique, les effets de marées terrestres, de charges océanique et atmosphérique, du mouvement de rotation du pôle terrestre et des effets locaux (pression atmosphérique) sont également à considérer.

Quelques-uns des apports d'un gravimètre absolu transportable tel que le FG5 sont mentionnés ci-après :

- étalonnage des gravimètres supraconducteurs et suivi de leurs dérives,
- suivi des réseaux (tectonique, volcanologie),
- établissement de points dans les réseaux gravimétriques,
- rattachement de marégraphes,
- observation des variations de gravité à long terme,
- observation des variations temporelles en des sites particuliers (exemple de l'expérience de Brest).

Cet instrument constitue donc un outil complémentaire aux mesures géodésiques. La précision de ses mesures est meilleure que le centimètre en vertical et sa stabilité à long terme est inférieure à $2 \mu\text{Gal}$, soit $\pm 1 \text{ cm}$ en déplacement vertical dans le gradient à l'air libre [Hinderer, 1999].

ANNEXE D

MESURES LASER ET POINTS NORMAUX

Les observations laser sont souvent représentées selon deux axes : l'abscisse correspond au temps et l'ordonnée à l'écart à la prévision de la distance Terre-satellite, c'est-à-dire les différences entre les temps observés $Tobs_i$ et les temps calculés à partir d'éphémérides $Tcal_i$ aux dates d_i . Ces différences s'appellent les **résidus**. Les points répartis au hasard correspondent à des événements de bruit, tandis que les échos sur les satellites sont alignés (voir Figure 2.12).

Après un certain temps d'observation sur une cible donnée, on dispose d'un ensemble d'intervalles de temps aller-retour et d'un ensemble d'intervalles de temps calculés par les prévisions de passage de satellite, le tout aux mêmes dates. Les données $Tobs_i$ et $Tcal_i$ représentent les temps d'aller-retour (observés et calculés) de la croisée des axes mécaniques du télescope au panneau de rétroreflecteurs sur la cible considérée. Etant donné le nombre de mesures obtenues¹, il est nécessaire de disposer d'un moyen de condenser le nombre de données avec le minimum de perte d'information. On calcule ainsi la moyenne des dates de mesures et on cherche la date $d_i=d_m$ la plus proche de cette moyenne. A cette date correspond le temps d'aller-retour calculé. Le **point normal** qui représente le temps d'aller-retour mesuré moyen à la date d_m peut s'exprimer comme :

$$Tobs_m = Tcal_m + \overline{Tobs_i - Tcal_i} .$$

Un traitement statistique des mesures permet de générer des points normaux fournissant le temps de trajet aller-retour des impulsions à un instant donné. Ils offrent l'avantage de condenser l'information des données d'un passage tout en minimisant statistiquement les erreurs aléatoires de l'instrumentation. Leur construction à partir de mesures laser comporte deux étapes :

- l'ajustement d'une fonction de lissage des résidus des mesures de distance à partir de la production d'une orbite soustraite aux données,
- l'élimination du bruit et des points aberrants puis le calcul des valeurs moyennes des résidus précédemment obtenus.

Les valeurs de la fonction de lissage et de l'orbite prédite à l'époque d'observation sont ensuite ajoutées à la valeur moyenne pour produire un point normal qui doit ainsi être indépendant de la fonction de lissage et de l'orbite prédite utilisées. Cette procédure suit une recommandation générale pour toutes les stations laser et maintenue par l'ILRS.

On peut justifier l'utilisation d'une fonction de lissage de la façon suivante :

- élimination du bruit et des points aberrants des données,
- extraction d'une correction de la composante tangentielle de la trajectoire d'orbite prédite pouvant être utilisée pour améliorer les prédictions des passages suivants,
- étude de la distribution des données,
- formation des points normaux.

On peut prendre comme fonction de lissage un simple polynôme fonction du temps ou une fonction qui suit les corrections à appliquer à l'orbite de prédiction. Plusieurs paramètres de correction peuvent

¹ Par exemple, un écho par impulsion laser envoyée avec une cadence de 10 Hz représente environ 3 000 mesures en 5 mn.

être nécessaires : composantes tangentielle et normale, vitesses et accélérations normales et tangentielles. A l'issue de ce lissage, aucune tendance (rectiligne ou sinusoïdale) n'est plus visible dans les résidus laser. Cette condition est indispensable pour que les points normaux représentent bien la moyenne des résidus sur l'intervalle de temps considéré.

Dans la seconde étape de la création des points normaux, la procédure de détermination de la fonction de lissage et de l'orbite se fait par itérations successives. A chaque itération, chaque point est réexaminé et rejeté s'il a un résidu plus grand qu'un certain facteur multiplicatif de l'écart-type déterminé de l'itération précédente. Cette valeur peut varier de 2 à 3σ selon les stations ; elle vaut $2,5\sigma$ dans le cas des stations laser du plateau de Calern. Pour ces mêmes stations, les itérations s'arrêtent lorsque la différence entre les écarts-types de deux itérations successives est inférieur à 5%. Pour la sélection finale des points normaux, il faut que la distribution des résidus rende bien compte de la signature des satellites. Le point normal n'est corrigé d'aucun effet de manière à ce que n'importe quel analyste puisse utiliser les données sans être obligé d'utiliser un modèle de correction pouvant être erroné ou ne satisfaisant pas ses propres critères d'analyse.

Les points normaux sont calculés à partir des échantillons de mesures pour des périodes de 15 s à quelques minutes selon l'altitude du satellite. Par exemple pour LAGEOS, on calcule un point normal toutes les 2 mn tandis que ce temps d'intégration n'est que de 30 s pour STELLA.

La précision sur la valeur moyenne en distance du point normal correspond à $\sigma = \frac{\sigma_{ar}c}{2\sqrt{n}}$ où c est la vitesse de la lumière, n le nombre d'échos et σ_{ar} la précision du temps de vol aller-retour.

L'exactitude du point normal dépend de plusieurs paramètres :

- l'exactitude des horloges servant de base de temps au dateur. Dans le cas de l'Observatoire de la Côte d'Azur, elle est fournie par une horloge au césium du laboratoire temps - fréquences ayant une exactitude de l'ordre de 10^{-12} soit une erreur de 0,6 mm sur la distance parcourue par les photons,
- l'exactitude de la chronométrie du temps de vol,
- l'exactitude des mesures d'étalonnage, servant à s'affranchir des temps de transit des signaux électriques et lumineux dans l'ensemble de l'instrument,
- l'algorithme servant à rejeter les points aberrants (règle des 3σ ou $2,2\sigma$...) et à construire les points normaux.

Les points normaux ainsi formés, de même que certains paramètres caractéristiques de la distribution des résidus (moments d'ordres 1, 2, 3 et 4, différence entre la moyenne et le pic de la distribution), sont envoyés au minimum toutes les 24 h aux bases de données internationales comme le CDDIS (*Crustal Dynamics Data Center* à Munich). Les bases de données internationales sont alors constituées de fichiers composés d'une entête contenant des informations générales sur la station de télémétrie laser qui fournit les observations (identification, qualité, mode de fonctionnement, longueur d'onde du laser), la cible considérée, les dates d'observations, et la configuration du passage, puis une ligne par point normal. Chacune de ces lignes contient la valeur du point normal et un ensemble des données caractérisant un point normal (nombre d'échos, estimation de l'exactitude du point normal...), ainsi que les données météorologiques (pression, température, humidité) et la valeur de l'étalonnage.

ANNEXE E

PUBLICATIONS ET AUTRES CONTRIBUTIONS SCIENTIFIQUES

1. Article paru dans *Applied Optics*. Il s'agit d'une synthèse des applications scientifiques des mesures de la Station Laser Ultra Mobile, de ses caractéristiques techniques, des résultats de la campagne probatoire en Corse et des améliorations instrumentales qui étaient envisagées.
J. Nicolas, F. Pierron, M. Kasser, P. Exertier, P. Bonnefond, F. Barlier, and J. Haase, "French Transportable Laser Ranging Station: Scientific objectives, technical features, and performance", *Applied Optics: Lasers, Photonics, and Environmental Optics*, Vol. 39 Num.3, pp. 402-410, 20 January **2000**.
2. Article (2000) sous presse dans *Surveys in Geophysics*. Cet article résume les actions menées pour atteindre une exactitude centimétrique des mesures des stations laser de l'OCA.
J. Nicolas, F. Pierron, E. Samain, and F. Barlier, "Centimetre accuracy for the French Transportable Laser Ranging Station (FTLRS) through sub-system controls", *Surveys in Geophysics*, **2000**, in press.
3. Article (2000) sous presse dans *Surveys in Geophysics*. Cet article résume les contributions des mesures de télémétrie laser aux missions altimétriques.
P. Exertier, P. Bonnefond, J. Nicolas and F. Barlier, "Contributions of Satellite Laser Ranging to past and future radar altimetry missions", *Surveys in Geophysics*, **2000**, in press.
4. Article (2000) sous presse à l'INCT, Bulletin des Sciences Géographiques. Il s'agit d'une présentation des progrès récents en géodésie spatiale.
P. Exertier, J. Nicolas and P. Bonnefond, "Géodésie spatiale : avancées récentes", *INCT, Bulletin des Sciences Géographiques*, **2000**, pp. 3-15.
5. Compte rendu de colloque (1998) résumant les caractéristiques de la FTLRS ainsi que les modifications technologiques apportées. Ce document n'est pas fourni dans cette annexe car il est en grande partie repris dans l'article d'*Applied Optics*.
F. Pierron, J. Nicolas, M. Kasser, J. Haase, "Status and new capabilities of the French Transportable Laser Ranging Station", *Proceedings of the 11th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation*, compiled by W. Schlüter, U. Schreiber and R. Dassing, edited by the Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Deggendorf – Germany, 20-26 Sept. **1998**, Volume 1, pp. 104-112.
6. Compte rendu de colloque (1998) résumant les résultats de la campagne probatoire en Corse.
J. Nicolas, P. Exertier, P. Bonnefond, F. Pierron, and J. Haase, "First results with the French Transportable Laser Ranging Station", *Proceedings of the 11th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation*, compiled by W. Schlüter, U. Schreiber and R. Dassing, edited by the Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Deggendorf - Germany, 20-26 Sept. **1998**, Volume 1, pp. 113-120.

7. Compterendu de colloque (1999) présentant la méthode employée pour contrôler les biais des mesures des stations laser.

J. Nicolas, P. Exertier, P. Bonnefond, F. Pierron, Y. Boudon, J.-F. Mangin, F. Barlier, M. Kasser, and J. Haase, “*Stability control of range biases on the French laser ranging stations*”, Proceedings of the EOS/SPIE Symposium on Remote Sensing, Europto Series Vol. 3865, Florence – Italy, 20-24 Sept. **1999**, pp. 27-32.

8. Poster présenté au cours de l’IUGG99 sur l’expérience de co-localisation réalisée à l’OCA.

J. Nicolas, P. Exertier, P. Bonnefond, C. Berger, Y. Boudon, J.J. Walch, F. Barlier, E. Calais, J. Hinderer, J.-F. Crétaux, C. Boucher, and J. Haase, “*Collocation experiments at CERGA; CERGA-Grasse: an observatory for geodetic techniques*”, poster présenté au cours de la XXIIème assemblée générale de l’UGGI, Birmingham, 19-25 juillet **1999**.

9. Poster présenté à l’EGS2000 résumant les dernières modifications techniques de la FTLRS et les résultats des tests réalisés sur le chronomètre et le photodétecteur de retour.

J. Nicolas, F. Pierron, E. Samain, and F. Barlier, “*Centimetre accuracy for the French Transportable Laser Ranging Station (FTLRS) through sub-system controls*”, poster présenté pendant l’EGS XXV General Assembly 2000, Nice, 25-28 avril **2000**.

10. Présentations orales dans des colloques :

J. Nicolas, P. Exertier, F. Barlier, P. Bonnefond, and O. Laurain, “*Geodetic time series at Grasse, France, from a collocation experiment*”, présentation orale, EGS XXV General Assembly, Nice, 25-28 avril **2000**.

J. Nicolas, “*Les mesures de télémétrie laser et le contrôle de leur qualité*”, présentation orale lors du colloque fondateur d’AGRET, Paris, 16-17 novembre **1999**.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ABELE M., J. BALODIS, A. KALNINS, A. RUBANS, J. VJATERS, O. WEST et A. ZARINJSH, *Portable Satellite Laser Ranging System*, Proceedings of the 9th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, Camberra - Australia, Australian Government Publishing Service **Vol. 1**, Ed. Luck J., pp. 160-166, 1994.

APPLEBY G. et P. GIBBS, *Monitoring Potential Range Biases In Single-Photon SLR Systems*, Proceedings of the 9th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, Camberra - Australia, Australian Government Publishing Service **Vol. 1**, Ed. Luck J., pp. 92-102, 1994.

APPLEBY G.M., *center of masse corrections for Lageos and Etalon for single-photon ranging systems*, Proc. Of Annual Eurolas Meeting, pp. 18-29, 1995.

APPLER R.L., *Calibration error sources*, proceedings of the 6th international workshop on laser ranging instrumentation, Antibes - Juans les Pins, September 22nd -26th 1986, **2**, Ed. Baumont E. B. J. G. A. F., pp. 323 - 330, 1986.

ARGUS D. et M. HEFLIN, *Plate motion and crustal defromation estimated with geodetic data from the Global Positioning System*, Geophys. Res. Lett., **22**, pp. 1973-1976, 1995.

AYOUB NADIA, *Variabilité du niveau de la mer et de la circulation en Méditerranée à partir des données altimétriques et de champs de vent. Comparaison avec des simulations numériques.*, Thèse de doctorat en océanographie physique, Université Paul Sabatier (Toulouse III), 1997.

BALDI P. et S. ZERBINI, Proceedings of the international conferences on the WEGENER/MEDLAS Project, Third International conference, University of Bologna - Italy, Ed. 1988.

BARLIER F., *personnal communication*, 2000.

BARLIER F., C. BERGER, P. BONNEFOND, P. EXERTIER, O. LAURAIN, J.F. MANGIN et J.M. TORRE, *Laser-based validation of GLONASS orbits by short-arc technique*, Journal of Geodesy, in press, 2000.

BARLIER FRANÇOIS, P.Y. LE TRAON et A. CAZENAVE, *Point sur les missions d'altimétrie spatiale Topex/Poséïdon et ERS-1*, Comptes-rendus de l'Académie des Sciences - série II, **tome 323, n° 9**, 1996.

BARREDA ANA ROSA DE LA et MARIA DEL CAMINO RODRIGUEZ, *Déformations verticales de la croûte terrestre - Etude des effets de marées terrestre et polaires et de charge générés pas l'atmosphère et l'océan*, rapport de stage de DEA, Université Paris VII, 2000.

BERGER C., R. BIANCALE, M. ILL et F. BARLIER, *Improvement of the empirical thermospheric model DTM: DTM94 - a comparative review of various temporal variations and prospects in space geodesy applications*, Journal of Geodesy, pp. 72:161, 172:178, 1998.

BIANCALE R., G. BALMINO, J.M. LEMOINE, J.C. MARTY, B. MOYNOT, F. BARLIER, P. EXERTIER, O. LAURAIN, P. GEGOUT, P. SCHWINTZER, C. REIGBER, A. BODE, R. KÖNIG, F.H. MASSMANN, J.C. RAIMONDO, R. SCHMIDT et S. YUANG ZHU, *A new global Earth's gravity field model from satellite orbit perturbations: GRIM5-S1*, Geophys. Res. Lett., **27, N° 22**, pp. 3611-3614, 2000.

BIANCO G., M. SELDEN, M. BIENEMAN, C. CLARKE, M. HEINICK, D. MCCLURE, D. MOON, B. NALLAPPA, T. OLDHAM, R. SALA, C. STEGGERDA et R. STRINGFELLOW, *Two-color ranging upgrade for the MLRO system*, Proceedings of the 11th International Workshop on Laser Ranging, Deggendorf - Germany, published by the Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main **1**, Ed. Schlüter W., Schreiber U. et Dassing R., pp. 346-352, 1998.

BOCK OLIVIER, *Etude de la réalisation d'un télémètre laser aéroporté en champ large sur cibles réfléchissantes terrestres pour la mesure rapide de déformations verticales du sol. Etude de l'adaptation du système à un véhicule satellitaire*, thèse, 1996.

BOËR A. et U. HESSELS, *Two color laser ranging with the TIGO SLR system status and first results*, Proceedings of the 11th International Workshop on Laser Ranging, Deggendorf - Germany, published by the Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main **1**, Ed. Schlüter W., Schreiber U. et Dassing R., pp. 353-358, 1998.

BONNEFOND P., P. EXERTIER, P. SCHAFFER, S. BRUINS et F. BARLIER, *Satellite Altimetry from a Short-Arc Technique : Application to the Mediterranean*, J. Geophys. Res., **100 (C12)**, pp. 25365-25382, 1995.

BONNEFOND P., P. EXERTIER et F. BARLIER, *Monitoring SLR range biases from multisatellite long time series of laser residuals*, E.G.S., XXIII General Assembly, G15 - Instrumental Challenges in Geodesy, Nice - France, 20-24 April 1998, Ed. 1998.

BONNEFOND P., P. EXERTIER et F. BARLIER, *Geographically correlated errors observed from a laser-based short-arc technique*, J. G. R., **104 (7)**, pp. 15885-15893, 1999.

BONNEFOND P., *personnal communication*, 2000.

BONNEFOND PASCAL, *Méthode géométrique de trajectographie par arcs courts - Application à l'analyse des mesures altimétriques des satellites Topex/Poséidon et ERS-1 en Méditerranée*, thèse, 1994.

BOSWORTH J., R. COATES et T. FISCHETTI, *The development of NASA's Crustal Dynamics Project*, Contributions to Geodynamics : Technology, American Geophysical Union, Geodynamics Series, **Vol. 25**, pp. 1-20, 1993.

BOUCHER C., Z. ALTAMIMI et P. SILLARD, *IERS Technical Note 24, Results and Analysis of the ITRF96*, may 1998, Ed. Iers/Cb, 1998.

BOUCHER C., Z. ALTAMIMI et P. SILLARD, *The ITRF97*, IERS Technical Note, **27**, 1999a.

BOUCHER C., Z. ALTAMIMI et P. SILLARD, *The 1997 International Terrestrial Reference Frame (ITRF97)*, IERS Technical Note, **27**, 1999b.

BOUILLE FLORENCE, *Etude des systèmes actuels et futurs de positionnement spatial DORIS: détermination des mouvements du centre de masse de la Terre et interprétations géophysiques*, Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse III, 2000.

BOUIN MARIE-NOËLLE, *Traitement de données GPS en Antarctique : Mouvements crustaux, rebond post-glaciaire et systèmes de référence*, Thèse de doctorat, Observatoire de Paris, 1999.

BRUINSMA S., P. EXERTIER et R. BIANCALE, *An assessment of new satellite total density data for improving upper atmosphere models*, Planetary and Space Science, **47**, pp. 1465-1473, 1999.

CAZENAVE A., P. GEGOUT, L. SOUDARIN, K. DOMINH, F. BARLIER, P. EXERTIER et Y. BOUDON, *Geodetic results from Lageos 1 and DORIS satellite data*, Contributions of Space Geodesy to Geodynamics : Crustal Dynamics, edited by D.E. Smith and D.L. Turcotte, AGU, Washington D.C., **Geodyn. Ser. Vol. 23**, pp. 81-98, 1993.

CAZENAVE A., F. MERCIER, K. DOMINH, V. TOUMAZOU, P. BONNEFOND, M. CATALAN et P. SCHAEFFER, *Sea level changes in the Mediterranean and Black seas from satellite altimetry*, Global and Planetary change, soumis, 1999.

CHRISTENSEN E.J., B.J. HAINES et R.S. NEREM, *Calibration of TOPEX/Poseidon at platform Harvest*, J. Geophys. Res., **99 (C12)**, pp. 24465-24485, 1994.

CRETAUX J.F., L. SOUDARIN, A. CAZENAVE et F. BOUILLE, *Present-day tectonic plate motions and crustal deformations from the DORIS space system*, J.G.R., **Vol. 103, NO. B12**, pp. 30,167-130,181, 1998.

CRETAUX J.F., *communication orale*, IUGG99, 1999a.

CRETAUX J.F., *communication orale*, AGRET, Paris, 16-17 novembre 1999, Ed. 1999b.

DEGNAN J., *Millimeter Accuracy Satellite Laser Ranging: A Review*, Contributions of Space Geodesy to Geodynamics : Technology, **Geodynamics** **25**, pp. 133-162, 1993.

DEGNAN J., J. MCGARRY, T. ZAGWODZKI, P. TITTERTON, H. SWEENEY, H. DONOVAN, M. PERRY, B. CONKLIN, W. DECKER, J. CHEEK, A. MALLAMA, P. DUNN et R. RICKLEFS, *SLR2000 : An Inexpensive, Fully Automated, Eyesafe Satellite Laser Ranging System*, Proceedings of the 10th International Laser Ranging Instrumentation, Shanghai - China, Ed. 1996.

DEGNAN J. et J. MC GARRY, *SLR2000 : Eyesafe and autonomous single photoelectron satellite laser ranging at kilohertz rates*, Proceedings of SPIE Laser Radar Ranging and atmospheric Lidar Technique, EUROPTO Series, London, UK, 24-26 sept. 1997, **Vol. 3218**, Ed. Werner E. U. S. A. C., pp. 63-77, 1997.

DEGNAN J., *SLR2000 Project: engineering overview and status*, Proceedings of the 11th International Workshop on Laser Ranging, Deggendorf - Germany, published by the Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main **2**, Ed. Schlüter W., Schreiber U. et Dassing R., pp. 389-398, 1998a.

DEGNAN J., *personnal communication*, 1999.

DEGNAN JOHN, *CSTG Satellite and Lunar Laser Ranging Subcommission 1998 Annual Report*, http://ilrs.gsfc.nasa.gov/CSTG_report_1998.html, 1998.

DETTWILLER LUC, *Les lasers et leurs applications*, Ed. Ellipses, 1998.

DUNN P. et M. TORRENCE, *Geophysical Signal Or Instrumentation Noise ?*, Proceedings of the 9th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, Camberra - Australie, Australian Government Publishing Service **Vol. 1**, Ed. Luck J., pp. 364-370, 1994.

EANES R., *Sub-centimeter LAGEOS orbit determination: techniques, models, and applications*, présentation orale, EGS XXIII General Assembly, Nice - France, 20-24 avril 1998, Ed. 1998.

EXERTIER P., P. BONNEFOND et F. BARLIER, *Suivre l'évolution du niveau moyen de la Méditerranée*, Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et Télédétection, **N° 143 1996-3**, pp. 3-11, 1996.

EXERTIER P., *personnal communication*, 2000.

EXERTIER PIERRE, *Le mouvement orbital des satellites et l'observation de la Terre*, thèse d'habilitation à diriger des recherches, Nice - Sophia Antipolis, 1999.

FANTE, *Electromagnetic Beam Propagation In Turbulent Media - An Update*, Proceedings of the IEEE, **68**, n° **11**, Ed. pp. 1424-1443, 1980.

FEISSEL M., D. GAMBIS, A.M. GONTIER, C. BOUCHER et Z. ALTAMIMI, *Systèmes de référence*, XXIème Assemblée Générale de l'UGGI, rapport quadriennal 1991-1994, Boulder - USA, 2-14 juillet 1995, Ed. Cnfgg, pp. 15-24, 1995.

FLECHTNER F., <http://op.gfz-potsdam.de/prare/prare.html>, Mar. 08, 2000.

FRANCIS C.R., *The height calibration of ERS-1 radar altimeter*, Proceedings of the first ERS-1 symposium - Space at the service of our environment, **ESA SP-359 (I)**, Ed. Publ. E. S. A. S., pp. 381-393, 1992.

FRIDELANCE P., *L'expérience LASSO*, Thèse de doctorat de l'Université Paris VI, 1994.

FRIDELANCE P., *Les applications scientifiques du Transfert de Temps par Lien Laser (T2L2)*, Journée science et télémétrie laser, Plateau de Calern, Ed. Barlier F., 1997.

FRIDELANCE P., E. SAMAIN et C. VEILLET, *T2L2 - Time Transfer by Laser Link : a new optical time transfer generation*, Exp. Astron., **7**, pp. 193-207, 1997.

GNSS, <http://www.navcanada.ca/publications/satnav/archives/gnssfr1.htm>.

HAUSER J.P., *Effects of deviation from hydrostatic equilibrium on atmospheric corrections to satellite and lunar laser range measurements*, Journal of Geophysical Research, **vol. 94**, n° **B8**, pp. 10,182 -110,186, 1989.

HERRING T. et M. PEARLMAN, *Future developments and synergism of space geodetic measurement techniques*, Contributions to Geodynamics : Technology, American Geophysical Union, **Geodynamics Series, Volume 25**, pp. 21-25, 1993.

IERS, *IERS Standards*, IERS Technical Note, Observatoire de Paris, **13**, Ed. Mccarty D. D., 1992.

IERS, *IERS Annual Report 1997*, Observatoire de Paris, Ed. Gambis D., 1998.

ILRS, *First General Meeting of the International Laser Ranging Service (ILRS)*, http://ilrs.gsfc.nasa.gov/9809_gen_minutes.html, Tuesday, September 22, 1998.

JIYU L., *Satellite Laser Ranging Errors*, proceedings of the 6th international workshop on laser ranging instrumentation, Antibes - Juans les Pins, sept. 1986, **2**, Ed. Baumont E. B. J. G. A. F., pp. 379 - 398, 1986.

JPL, *TOPEX/POSEIDON science Investigation Plan*, septembre 1991, Ed. Publication J., 1991.

KASSER M. et G. LUND, *A new concept of spatial retroreflector for high precision satellite laser ranging*, Proceedings of the 9th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, Camberra - Australia, Australian Government Publishing Service **Vol. 1**, Ed. Luck J., pp. 39-49, 1994a.

KASSER M. et G. LUND, *A New Concept Of Spatial Retroreflectors for High Precision Satellite Laser Ranging*, Proceedings of the 9th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, Camberra - Australia, Australian Government Publishing Service **Vol. 1**, Ed. Luck J., pp. 39-49, 1994b.

KASSER M. et O. BOCK, *A new way for reducing biases in SLR timing*, Proceedings of the 11th International Workshop on Laser Ranging, Deggendorf (Germany), published by the Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main **2**, Ed. Schlüter W., Schreiber U. et Dassing R., pp. 664-673, 1998.

KIRCHNER G. et F. KOIDL, *Automatic SPAD time walk compensation*, Proceedings of the 10th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, Shanghai - China, Shanghai Observatory, Chinese Academy of Sciences Ed. Fumin Y. et Wanzhen C., pp. 293-296, 1996.

KIRCHNER G., F. KOIDL, J. BLAZEJ, K. HAMAL et I. PROCHAZKA, *Time walk compensated SPAD : Multiple Photons Versus Single Photon Operation*, Proceedings of SPIE Laser Radar Ranging and atmospheric Lidar Technique, EUROPTO Series, London, UK, 24-26 sept. 1997, **Vol. 3218**, Ed. Werner E. U. S. A. C., pp. 106-112, 1997.

LARNICOL G., P.Y. LE TRAON, N. AYOUB et P. DE MEY, *Mean sea level and surface circulation variability of the Mediterranean Sea from 2 yaers of TOPEX/POSEIDON altimetry*, J. G. R., **100 (C12)**, pp. 25163-25177, 1995.

LENA P., *Astrophysique, méthodes physiques de l'observation*, Ed. InterEditions/CNRS, Série Savoirs actuels, 1996.

LUCCHINI C., *Téléométrie Laser Deux Couleurs*, thèse, 1995.

LUCK J., *Personnal communication*, 1999.

MARINI J.W. et C.W. MURRAY, *Correction of laser range tracking data for atmospheric refraction at elevations above 10 degrees*, NASA report X-591-73-351, Goddard Space Flight Center, 1973.

MARSHALL J.A., S.M. KLOSKO et J.C. REIS, *Dynamics of SLR tracked satellites*, National report to IUGG, 1991-1994, Rev. Geophys., Suppl., American Geophysical Union, **Vol. 33**, 1995.

MENARD Y., E. JEANSOU et P. VINCENT, *Calibration of TOPEX/Poseidon altimeters at Lampedusa : Additional results at Harvest*, J. Geophys. Res., **99 (C12)**, pp. 24487-24504, 1994.

METRIS G., D. VOKROUHLICKY, J. RIES et R. EANES, *Non gravitationnal effects and the LAGEOS excentricity excitations*, J. G. R., **102 (B2)**, pp. 2711-2729, 1997.

MITCHUM GARY T., *Comparison of TOPEX sea surface heights and tide gauge sea levels*, Journal of Geophysical Research, **99 (C12)**, pp. 24,541-524,553, 1994.

MLRO, *Matera LAserv ranging Observatory*,
<http://www.asi.it/00HTL/eng/asicgs/geodynamics/mlro.html>, May 28, 1999.

NEUBERT R., *Satellite signature model, application to LAGEOS and TOPEX*, EUROLAS Meeting, Munich-Germany, March 20-21, 1995, Ed. 1995.

NICOLAS J., P. EXERTIER, P. BONNEFOND, F. PIERRON et J. HAASE, *First results with the French Transportable Laser Ranging Station*, Proceedings of the 11th International Workshop on Laser Ranging, Deggendorf - Germany, published by the Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main **1**, Ed. Schlüter W., Schreiber U. et Dassing R., pp. 113-120, 1998.

NICOLAS J., P. EXERTIER, P. BONNEFOND, F. PIERRON, Y. BOUDON, J.F. MANGIN, F. BARLIER, M. KASSER et J. HAASE, *Stability control and range biases on the French laser ranging stations*, Proceedings of EUROPTO - SPIE Laser Radar Ranging and Atmospheric Lidar Technique II, Florence - Italy, **Vol. 3865**, Ed. Werner E. U. S. A. C., pp. 27-32, 1999.

NICOLAS J., F. PIERRON, M. KASSER, P. EXERTIER, P. BONNEFOND, F. BARLIER et J. HAASE, *French transportable Laser Ranging Station : scientific objectives, technical features, and performance*, Applied Optics, **Vol. 39, No. 3**, pp. 402-410, 2000.

NOUËL F., J.P. BERTHIAS, M. DELOUZE, A. GUITART, P. LAUDET, A. PIUZZI, D. PRALINES, C. VALORGE, C. DEJOIE, M.F. SUSINI et D. TUBARIAU, *Precise Centre National d'Etudes Spatiales orbits for TOPEX/Poseidon : is reaching 2 cm still a challenge ?*, J. Geophys. Res., **99 (C12)**, pp. 24405-24419, 1994.

OTSUBO T., J. AMAGAI et H. KUNIMORI, *Dependence of AJISAI's center-of-masse correction on laser ranging system*, Proceedings of the 10th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, Shanghai - China, Shanghai Observatory, Chinese Academy of Sciences Ed. Fumin Y. et Wanzhen C., pp. 223-232, 1996.

OTSUBO T., J. AMAGAI et H. KUNIMORI, *Satellite signature effects by ranging system and by satellite attitude*, Proceedings of SPIE Laser Radar Ranging and atmospheric Lidar Technique, EUROPTO Series, London, UK, 24-26 sept. 1997, **Vol. 3218**, Ed. Werner E. U. S. A. C., pp. 50-54, 1997.

OWENS J.C., *Optical refractive index of air: Dependence on pressure, temperature, and composition*, Applied Optics, **6**, pp. 51-58, 1967.

PELLOQUIN NICOLAS, *Etude des problèmes atmosphériques liés à la télémétrie Laser-Lune*, rapport de stage de fin d'étude élève ingénieur ENSSAT, 1997.

PEROSANZ F., J.C. MARTY et G. BALMINO, *Dynamic orbit determination and gravity field model improvement from GPS, DORIS and Laser Measurements on TOPEX/Poseidon satellite*, Journal of Geodesy, **volume 71, Issue 3**, 160-170, 1997.

PROCHAZKA I., K. HAMAL et B. GREEN, *SPAD detectors for ranging with sub-millimeter bias*, Proceedings of the 10th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, Shanghai - China, Shanghai Observatory, Chinese Academy of Sciences Ed. Fumin Y. et Wanzhen C., pp. 287-292, 1996.

SAMAIN E. et P. FRIDELANCE, *Time Transfer by Laser Link (T2L2) experiment on Mir*, Metrologia, **35**, pp. 151-159, 1998.

SAMAIN E., J.F. MANGIN, C. VEILLET, J.M. TORRE, P. FRIDELANCE, J.E. CHABAUDIE, D. FERAUDY, M. GLENTZLIN, J. PHAM VAN, M. FURIA, A. JOURNET et G. VIGOUROUX, *Millimetric Lunar Laser Ranging at OCA*, Astronomy and Astrophysics Supplement Series, **130**, pp. 235-244, 1998.

SAMAIN E., *Personnal communication*, 1999a.

SAMAIN E., *communication orale*, AGRET, Paris, 16-17 novembre 1999, Ed. 1999b.

SAMAIN E., *Personnal communication*, 2000.

SAMAIN ETIENNE, *Le Laser Lune millimétrique et nouvelles méthodes de datation optique*, thèse, 1995.

SCHARROO R. et P.N.A.M. VISSER, *Precise orbit determination and gravity field improvement for the ERS satellites*, J. G. R., **103 (C4)**, pp. 8113-8127, 1998.

SCHLÜTER W., H. HASE et A. BÖER, *TIGO - A geodetic observatory for the improvement of the global reference frame*, Proceedings of EUROPTO - SPIE Laser Radar Ranging and Atmospheric Lidar Technique II, Florence - Italy, **Vol. 3865**, Ed. Werner E. U. S. A. C., pp. 2-17, 1999.

SCHREIBER U. et K. H. HAUFE, *Timewalk in Avalanche Photodiode*, Proceedings of the 11th International Workshop on Laser Ranging, Deggendorf - Germany, published by the Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main **2**, Ed. Schlüter W., Schreiber U. et Dassing R., pp. 445-451, 1998.

SCHREIBER U., A. SCHLICHT et K. H. HAUFE, *Systematic biases in laser ranging measurements*, Proceedings of EUROPTO - SPIE Laser Radar Ranging and Atmospheric Lidar Technique II, Florence - Italy, 20-21 Septembre 1999, **Vol. 3865**, Ed. Werner E. U. S. A. C., pp. 64-73, 1999.

SCHWARTZ J., *Pulse spreading and range correction analysis for satellite laser ranging*, Applied Optics, **Vol. 29**, N° **25**, pp. 3597-3602, 1990.

SILLARD PATRICK, *Modélisation des systèmes de référence terrestres - Contribution théorique et méthodologique*, thèse de doctorat, Observatoire de Paris, 1999.

SMITH D. et D. TURCOTTE, *Contributions of Space Geodesy to Geodynamics: Crustal Dynamics*, *Geodynamics Series*, American Geophysical Union, **Vol. 23**, Ed. 1993a.

SMITH D. et D. TURCOTTE, *Contributions of Space Geodesy to Geodynamics: Earth Dynamics*, *Geodynamics series*, American Geophysical Union, **Vol. 24**, Ed. 1993b.

SMITH D. et D. TURCOTTE, *Contributions of Space Geodesy to Geodynamics: Technology*, *Geodynamics Series*, American Geophysical Union, **Vol. 25**, Ed. 1993c.

SPERBER P., R. MOTZ, P. SCHÖTZ, M. MABERRY et R. ZANE, *Tests and Developments at the MTLRS-1 Receiving System*, Proceedings of the 9th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, Camberra - Australia, Australian Government Publishing Service **Vol. 2**, Ed. Luck J., pp. 400-406, 1994a.

SPERBER P., W. SCHLÜTER, A. BÖER, R. DASSING, H. HASE et R. KILGER, *The Transportable Integrated Geodetic Observatory (TIGO)*, Proceedings of the 9th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, Camberra - Australia, Australian Government Publishing Service **vol. 1**, Ed. Luck J., pp. 183-197, 1994b.

SPERBER P., A. BOER, R. DASSING, H. HASE, W. SCHUETER et R. KILGER, *TIGO - Project : concept - status- plans*, Proceedings of the 10th International Laser Ranging Instrumentation, Shanghai - China, Ed. pp. 135-144, 1996.

STOUFS H.G., *Analyse des données de poursuite de satellites de la station laser ultra mobile (CERGA/CNES/IGN) - Campagne d'Ajaccio*, mémoire de fin d'étude ingénieur, 1997.

SUING M., *Les positions des stations du Réseau GPS Permanent*, rapport de stage de fin d'étude ESGT, 1999.

TAPLEY B., B. SCHUTZ, R. EANES, J. RIES et M. WATKINS, *LAGEOS laser ranging contributions to geodynamics, geodesy, and orbital dynamics*, *Geodynamics Series - Contributions of Space Geodesy to Geodynamics: Earth Dynamics*, **Vol. 24**, pp. 147-174, 1993.

TORRE JEAN-MARIE, *Téléométrie par laser sur les satellites artificiels et sur la Lune*, Rapport pour l'obtention du titre d'Ingénieur diplômé d'état spécialité opto-électronique, 1998.

VEILLET C. et C. SALOMON, *ACES: Atomic Clock Ensemble in Space*, first symposium on the utilisation of the International Space Station, Ed. Esa, 1996.

VERMAAT E., J. DEGNAN, P. DUNN, R. NOOMEN et A. SINCLAIR, *Satellite laser ranging, status and impact for Wegener*, J. Geodynamics, **Vol 25, n° 3/4**, pp. 195-212, 1998.

WILLIS P., J. SLATER, G. BEUTLER, W. GURTNER, C. NOLL, R. WEBER, R.E. NEILAN et G. HEIN, *The IGEX-98 campaign: Highlights and perspective*, Geodesy beyond 2000 - The challenges of the first decade, International Association of Geodesy Symposia, Springer Verlag **Vol. 121**, Ed. Schwarz, pp. 22-25, 1999.

WÖPPELMAN GUY, *Rattachement géodésique des marégraphes dans un système de référence mondial par techniques de géodésie spatiale*, Thèse de doctorat de l'Observatoire de Paris, 1997.

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1.1 : Schéma de principe des observations de télémétrie laser basé sur le fonctionnement de la station laser satellites fixe de l'Observatoire de la Côte d'Azur.	17
Figure 1.2 : Diversité des orbites des satellites observés par la technique de la télémétrie laser (d'après NASA).	21
Figure 1.3 : Rétroreflecteur en forme de coin de cube	21
Figure 1.4 : Différents satellites dédiés à la télémétrie laser. Le rapport d'échelle des dimensions des différents satellites est conservé. A titre indicatif, le diamètre du satellite LAGEOS est de 60 cm.	22
Figure 1.5 : Panneau de rétroreflecteurs laser déposé sur la Lune lors de la mission Apollo XI en 1969 (d'après NASA).	23
Figure 1.6 : Carte de la répartition géographique des stations laser constituant le réseau international (d'après ILRS).	24
Figure 1.7 : Evolutions parallèles du nombre de stations laser et des résidus laser sur LAGEOS depuis 1976 (d'après la solution NASA SL7.0, 1991).	26
Figure 1.8 : Schéma de principe de l'étalonnage d'un altimètre radar embarqué sur un satellite océanographique par une station de télémétrie laser [Bonnefond, 1994].	31
Figure 1.9 : Principe du Transfert de Temps par Lien Laser (d'après Samain).	33
Figure 1.10 : Vue d'artiste de la Station Spatiale Internationale (SSI) telle que prévue en 2004 (d'après NASA).	33
Figure 2.1 : Station laser satellites fixe du plateau de Calern.	46
Figure 2.2 : Télescope de la station laser satellites fixe du plateau de Calern. Sur la gauche de celui-ci, on distingue l'optique d'émission du laser et l'équerre optique (boîte blanche) servant pour les mesures d'étalonnage. Sur le haut se trouve la lunette de visée.	46
Figure 2.3 : Station laser Lune du plateau de Calern.	47
Figure 2.4 : La Station Laser Ultra Mobile à Ajaccio au cours de la campagne en Corse (1997). On peut distinguer sur la gauche la station météorologique et l'antenne GPS. L'ensemble du reste de l'instrumentation se trouve sur la droite. La tente protectrice est repliée au sol à l'arrière de la station.	48
Figure 2.5 : Schéma synoptique de la Station Laser Ultra Mobile.	50
Figure 2.6 : Banc laser de la Station Laser Ultra Mobile.	51
Figure 2.7 : Schéma optique du banc laser de la Station Laser Ultra Mobile.	51
Figure 2.8 : Répartition spatiale de l'énergie d'un faisceau laser en mode TEM ₀₀ .	52
Figure 2.9 : Effet du passage de la lumière à travers un cristal non linéaire KDP.	52
Figure 2.10 : Vue à l'oscilloscope d'un train d'impulsions laser par l'intermédiaire d'un photodétecteur à bande passante limitée (500 MHz).	53
Figure 2.11 : Schéma d'un demi train d'impulsions laser. On peut voir devant l'impulsion la plus énergétique des impulsions imparfaitement éliminées (~1% de l'impulsion la plus énergétique).	53
Figure 2.12 : Passage d'un satellite illustrant les effets des différences de niveau. Le début est acquis en mode de détection simple photo-électron tandis que la fin est observée dans un mode multi-photoélectron. Dans la seconde partie du passage, on peut voir les datations effectuées sur les impulsions imparfaitement découpées (échos avant la trace principale). L'échelle de temps est en abscisse et donne la durée du passage. L'ordonnée correspond aux résidus des observations par rapport à une orbite de référence.	54
Figure 2.13 : Tourelle et télescope de la Station Laser Ultra Mobile.	55
Figure 2.14 : Schéma optique de l'intérieur de la tourelle de la Station Laser Ultra Mobile. La photodiode à avalanche indiquée ici est remplacée par une fibre optique pour les expériences de transfert de temps.	56
Figure 2.15 : Schéma de la procédure d'étalonnage de la station laser Lune du plateau de Calern. L'étalonnage interne se fait via la fibre optique et le rétroreflecteur laser placé sur l'araignée du télescope sert à vérifier régulièrement la valeur d'étalonnage interne.	58
Figure 2.16 : Schéma du dispositif d'étalonnage des mesures de la station laser satellites fixe du plateau de Calern	59
Figure 2.17 : Schéma du montage du rétroreflecteur d'étalonnage fixé au télescope de la Station Laser Ultra Mobile.	60
Figure 2.18 : Nouveau dispositif d'étalonnage des mesures de la FTLRS.	61
Figure 2.19 : Système de densités optiques placé dans le banc laser avant l'amplificateur double passage.	61

Figure 2.20 : Système rotatif de densités optiques placé dans la tourelle devant la C-SPAD.	62
Figure 2.21 : Résumé des particularités d'une C-SPAD par rapport à une photodiode à avalanche classique (d'après [Kirchner et al., 1997]).	78
Figure 2.22 : Obturateur électro-optique installé dans la tourelle de la Station Laser Ultra Mobile. L'obturateur est en position ouverte à gauche et fermée à droite.	82
Figure 2.23 : Exemple de biais introduits par la transmission du signal de détection de retour par les contacts tournants de la tourelle.	85
Figure 2.24 : La Station Laser Ultra Mobile et le télescope de la station laser Lune lors de l'expérience de faisabilité de transfert de temps en juin 1998.	87
Figure 2.25 : Effet de la signature des satellites sur les histogrammes des résidus laser pour les satellites suivants : (a) STELLA, (b) LAGEOS-1, (c) TOPEX/POSEIDON, (d) WESTPAC, (e) GLONASS 80 et (f) AJISAI. Pour GLONASS, la distribution des résidus n'est pas uniforme et présente une lacune en son centre en raison d'un trou dans la répartition des rétro-réfléchisseurs au centre du panneau.	91
Figure 2.26 : Illustration de la diversité de disposition des rétro-réfléchisseurs laser sur les satellites. (a) satellite STELLA ; (b) couronne de rétro-réfléchisseurs du satellite SUNSAT ; (c) les 4 rétro-réfléchisseurs du satellite CHAMP répartis sur un prisme de 5 cm de diamètre ; (d) ensemble des 9 rétro-réfléchisseurs répartis sur un cône de 20 cm de diamètre embarqué sur les satellites ERS-1 et -2 et prévu pour ENVISAT ; (e) ensemble des 9 rétro-réfléchisseurs répartis sur un cône de 18 cm de diamètre embarqué sur le satellite GFO-1 et prévu pour les satellites JASON-1 et ICESAT ; (f) panneau des 32 rétro-réfléchisseurs des satellites GPS (239x194x37 mm ³).	92
Figure 2.27 : Schéma de la couronne des rétro-réfléchisseurs laser placée sous l'antenne de l'altimètre de TOPEX/POSEIDON. Le diamètre de cette couronne est d'environ 85 cm (d'après [Schwartz, 1990]).	93
Figure 2.28 : Géométrie de l'influence de la direction de la station sur la correction de centre de masse dans le cas de TOPEX/POSEIDON (d'après [Schwartz, 1990]).	94
Figure 2.29 : Satellite WESTPAC.	96
Figure 2.30 : Schématisation exagérée de l'effet de courbure du faisceau laser lié à la propagation dans l'atmosphère. D0 correspond à la distance réelle que l'on désire mesurer et D1 représente la distance effectivement mesurée.	98
Figure 2.31 : Correction sur la distance station-satellite liée à la propagation dans l'atmosphère du faisceau laser et donnée par le modèle de Marini-Murray au plateau de Calern (H = 1,270 km, $\Phi = 43,75^\circ$, $\lambda = 532$ nm) pour des conditions atmosphériques moyennes ($P_a = 1$ atm, T = 15°C, U = 50%).	100
Figure 2.32 : Courbe de sensibilité des erreurs de correction en distance du modèle de Marini-Murray en fonction des erreurs de mesures des paramètres d'entrée (température en °C, pression en mb et pourcentage d'humidité).	103
Figure 2.33 : Schéma du banc expérimental utilisé pour l'étude du photodétecteur de retour.	106
Figure 2.34 : Effet sur la chronométrie de la variation du nombre de photons incidents sur la surface sensible du photodétecteur. Les valeurs sont indiquées par rapport à une origine arbitraire.	108
Figure 2.35 : Effet centre-bord mesuré sur la C-SPAD de la Station Laser Ultra Mobile selon deux axes perpendiculaires X et Y arbitraires. Le rendement relatif correspond au rapport du nombre de photons détectés sur le nombre de photons envoyés.	109
Figure 2.36 : Effet de photons arrivant à côté de la surface sensible du photodétecteur de retour.	109
Figure 2.37 : Délai nécessaire à l'établissement du signal Geiger.	110
Figure 2.38 : Effet sur la chronométrie de la sensibilité thermique du détecteur de retour.	110
Figure 2.39 : Schéma du banc expérimental utilisé pour l'étude de la linéarité du chronomètre.	112
Figure 2.40 : Ecart à la linéarité de la chronométrie en fonction du délai à mesurer.	113
Figure 3.1 : Différences d'ajustement de coordonnées des stations laser satellites (7835) et laser Lune (7845) du plateau de Calern. Ce positionnement a été déterminé à partir du cumul des matrices normales pour les satellites LAGEOS -1 et -2 et par rapport à l'ITRF97. Les valeurs sont indiquées en mètres.	130
Figure 3.2 : Variations saisonnières observées sur 3 ans d'ajustement de coordonnées à partir des mesures de la station laser satellites fixe du plateau de Calern sur les satellites LAGEOS -1 et -2 et par cumul des observations sur les deux satellites. Les ajustements de coordonnées sont déterminés à partir de l'ITRF97 et sont indiqués en mètres. Le trait vertical indique la date de changement du photodétecteur de retour (fin septembre 1997).	132
Figure 3.3 : Comparaison des variations d'altitude du plateau de Calern obtenues à partir des mesures laser (étoiles), des points gravimétriques G et L (ronds et carrés) et du signal GPS (ligne continue). L'origine est arbitraire et les valeurs sont indiquées en millimètres.	136
Figure 3.4 : Série temporelle du positionnement de la station de Graz (7839) en Autriche pour les années 1997 à 1999 à partir des observations des satellites LAGEOS-1 et -2.	138

- Figure 3.5 :** Série temporelle du positionnement de la station de Herstmonceux (7840) en Grande-Bretagne pour les années 1997 à 1999 à partir des observations des satellites LAGEOS-1 et -2. _____ 139
- Figure 3.6 :** Série temporelle du positionnement de la station de Greenbelt (7105) aux Etats-Unis (Maryland) pour les années 1997 à 1999 à partir des observations des satellites LAGEOS-1 et -2. _____ 140
- Figure 3.7 :** Série temporelle du positionnement de la station de Mc Donald (7080) aux Etats-Unis (Texas) pour les années 1997 à 1999 à partir des observations des satellites LAGEOS-1 et -2. _____ 141
- Figure 3.8 :** Série temporelle du positionnement de la station de Mt Peak (7110) aux Etats-Unis (Californie) pour les années 1997 à 1999 à partir des observations des satellites LAGEOS-1 et -2. _____ 142
- Figure 3.9 :** Série temporelle du positionnement de la station de Yarragadee (7090) en Australie pour les années 1997 à 1999 à partir des observations des satellites LAGEOS-1 et -2. _____ 143
- Figure 3.10 :** Série temporelle du positionnement de la station d'Arequipa (7403) au Pérou pour les années 1997 à 1999 à partir des observations des satellites LAGEOS-1 et -2. _____ 144
- Figure 3.11 :** Série temporelle du positionnement de la station d'Haleakala (7210) à Hawaii pour les années 1997 à 1999 à partir des observations des satellites LAGEOS-1 et -2. _____ 145
- Figure 3.12 :** Série temporelle du positionnement des stations européennes de Grasse, Graz et Herstmonceux à partir des calculs obtenus au GRGS à Toulouse, avec (en traits fins) et sans (en gras) ajustement du réseau de stations. Ce positionnement est réalisé chaque mois. _____ 146
- Figure 3.13 :** Comparaison de la déformation totale de la composante verticale (en m) modélisée (ligne continue) et du positionnement laser (étoiles). La modélisation correspond à l'addition des effets de marées terrestre (MT), de marée polaire (MP) et de charge atmosphérique (Atm). _____ 149

Figure B.1 : TIGO durant les tests à Wettzell (Allemagne) en 1998. Le container de gauche correspond au module de télémétrie laser et à son télescope. Les deux autres contiennent l'alimentation électrique produite à partir d'énergie solaire en tant que source ininterrompue, les capteurs météorologiques, les horloges atomiques et les étalons de fréquence, l'ordinateur et les équipements de transmission des données. Le module VLBI et son antenne radio pliable sont situés sur le côté droit. _____ 164

Figure B.2 : Ensemble de télémétrie laser de TIGO. _____ 164

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Principaux satellites équipés de rétroreflecteurs laser. Les missions actuelles sont classées par ordre de priorité d'observation.	19
Tableau 1.2 : Résumé de 25 ans de missions altimétriques. Erreur radiale d'orbite prévue, précision de l'altimètre embarqué, erreur radiale d'orbite obtenue (avec, entre parenthèses, les meilleurs résultats obtenus), et technique laser comme technique de poursuite unique (suite à une défaillance de l'autre système de poursuite) (** ou non (*). D'après [Exertier, 2000].	29
Tableau 1.3 : Comparaison des précisions moyennes en position et en vitesse pour les différentes solutions utilisées dans ITRF97.	35
Tableau 2.1 : Résumé des caractéristiques actuelles de la Station Laser Ultra Mobile.	48
Tableau 2.2 : Probabilité de détection en fonction du nombre de photons incidents pour un photodétecteur dont la réponse suit la loi de Poisson. Le rendement quantique utilisé est de 0,2.	76
Tableau 2.3 : Comparatif des caractéristiques d'une photodiode à avalanche et d'un photomultiplicateur. PM indique les photomultiplicateurs classiques qui ne sont plus utilisés en télémétrie laser en raison de leurs performances médiocres. MCP indique les photomultiplicateurs à galettes de microcanaux, bien plus coûteux, mais présentant des performances très intéressantes.	77
Tableau 2.4 : Erreur globale sur la correction de propagation dans l'atmosphère à partir du modèle de Marini-Murray pour différentes hauteurs de satellite. L'erreur quadratique a été estimée pour des incertitudes de pression de 0,2 mb, de température de 1°C et de 10% d'humidité relative.	104
Tableau 2.5 : Bilan d'erreur provisoire pour la FTLRS.	117
Tableau 3.1 : Stations utilisées pour le calcul d'orbites.	125
Tableau 3.2 : Estimation du bilan d'erreur d'orbitographie sur LAGEOS pour des arcs d'orbites de 10 jours et les modèles indiqués au milieu de la période étudiée (d'après [Exertier, 1999]).	127
Tableau 3.3 : Biais annuels moyens (en mm) et nombre de points normaux utilisés pour leur détermination pour les années 1997 à 1999 estimés à partir des orbites des satellites LAGEOS -1 et -2.	129
Tableau 3.4 : Différences des ajustement de coordonnées entre la station laser satellites et la station laser Lune du plateau de Calern. Ces valeurs sont estimées en millimètres à partir des ajustements de coordonnées issus du cumul des observations des satellites LAGEOS -1 et -2 au cours des années 1997 à 1999. A titre indicatif les différences de biais entre les deux stations sont également indiquées.	131
Tableau 3.5 : Comparaison entre différentes estimations des valeurs d'excentricité entre les deux stations laser satellites fixe et laser Lune du plateau de Calern.	131
Tableau 3.6 : Différences entre les coordonnées moyennes de la station laser satellites fixe du plateau de Calern et le repère ITRF97.	133
Tableau 3.7 : Données gravimétriques (en μGal) fournies par J. Hinderer et M. Amalvict.	134

ACRONYMES

- ACES** : *Atomic Clock Ensemble in Space*
- AGRET** : Astrométrie, Géodynamique et système de Référence
- CCD** : *Charge Coupled Device*
- CCR** : *Corner Cube Retroreflector*
- CDDIS** : *Crustal Dynamics Data Center* (Munich)
- CERGA** : Centre d'Etudes et de Recherches en Géodynamique et Astrométrie (Grasse)
- CHAMP** : *CHallenging Minisatellite Payload for geoscience and application*
- CNES** : Centre National d'Etudes Spatiales
- C-SPAD** : *Compensated Single Photon Avalanche Diode*
- CSTG** : *International Coordination of Space Techniques for Geodesy and geodynamics*
- DORIS** : Détermination d'Orbite et Radiopositionnement Intégrés par Satellite ou
- EOST** : Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre (Strasbourg)
- ERS** : *European Remote sensing Satellite*
- FG5** : nom du gravimètre absolu transportable de l'EOST
- FTLRS** : *French Transportable Laser Ranging Station* ou Station Laser Ultra Mobile
- GFO** : *Geosat Follow-On*
- GFZ** : *GeoForschungsZentrum* (Postdam)
- GINS** : Géodésie par Intégrations Numériques Simultanées (logiciel de calcul d'orbite)
- GLONASS** : *GLObal NAVigation Satellite System*
- GPS** : *Global Positioning System*
- GRIM** : *GRGS and Institut Munchen*
- HTLRS** : *Highly Transportable Laser Ranging Station*
- ICESAT** : *Ice Cloud and land Elevation SATellite*
- IERS** : *International Earth Rotation Service*
- IGEX-98** : *International GLONASS Experiment-1998*
- IGN** : Institut Géographique National
- ILRS** : *International Laser Ranging Service*
- INSU** : Institut National des Sciences de l'Univers
- ITRF** : *International Terrestrial Reference Frame*
- ITRS** : *International Terrestrial Reference Service*
- KDP** : cristal anisotrope permettant de doubler la fréquence d'émission des laser Nd:YAG
- LAGEOS** : *LAser GEOsynamics Satellite*
- LAREG** : Laboratoire de Recherche en Géodésie
- LLR** : *Lunar Laser Ranging* ou télémétrie laser Lune
- MCP** : *Microchannel Plate Detector*

MLRO : *Matera Laser Ranging Observatory*

MOBLAS : *MOBile LASer ranging system*

MTLRS : *Modular Transportable Laser Ranging System*

NASA : *National Aeronautic and Space Administration*

Nd:YAG : type de laser couramment utilisé en télémétrie laser (grenat dopé au néodyme)

NUVEL : modèle de mouvements tectoniques basés sur les données géophysiques

OCA : Observatoire de la Côte d'Azur

PHARAO : Projet d'Horloge par Refroidissement d'Atomes en Orbite

PM : photomultiplicateur

PRARE : *Precise Range And Range-rate Equipment*

rms : écart quadratique moyen

SLR : *Satellite Laser Ranging* ou télémétrie laser

SLR2000 : projet américain de petites stations de télémétrie laser entièrement automatiques

SPAD : *Single Photon Avalanche Photodiode*

SPOT : Système Probatoire d'Observation de la Terre

T2L2 : Transfert de Temps par Lien Laser ou *Time Transfer by Laser Link*

TEM₀₀ : *Transverse Electric and Magnetic*, mode transverse fondamental

TIGO : *Transportable Integrated Geodetic Observatory*

TLRS : *Transportable Laser Ranging System*

TOPEX/POSEIDON (T/P) : *TOPography EXperiment for ocean circulation/Positioning Ocean Solid Earth Ice Dynamics Orbiting Navigator*

UTC : *Universal Time Coordinated*

VLBI : *Very Long Baseline Interferometry*

WEGENER : *Working group of European Geoscientists for the establishment of Network for Earth-science Research*

RESUME

La Station Laser Ultra Mobile est la plus petite station de télémétrie laser au monde, ne pesant que 300 kg, dédiée à la poursuite de satellites équipés de rétroreflecteurs laser. Elle utilise un petit télescope de 13 cm de diamètre placé sur une monture issue d'un théodolite de précision et motorisé, un laser très compact et une photodiode à avalanche permettant la détection au niveau du simple photo-électron. Les premières expériences (Corse, fin 1996) ont révélé des instabilités dans la qualité des mesures. Ce travail concerne l'étude et la mise en place de nombreuses modifications techniques afin d'atteindre une exactitude centimétrique des mesures et de pouvoir participer à la campagne de validation des orbites et d'étalonnage de l'altimètre du satellite océanographique JASON-1 (2001). La précision instrumentale souhaitée a été vérifiée avec succès en laboratoire.

Outre cet aspect instrumental et métrologique, une analyse a été développée afin de pouvoir estimer l'exactitude et la stabilité des observations de la station mobile après intégration des modifications. A partir d'une expérience de co-localisation entre les deux stations laser fixe du plateau de Calern, on a fait une analyse fondée sur l'ajustement, par station, de coordonnées et d'un biais instrumental moyen à partir d'une orbite de référence des satellites LAGEOS. Des variations saisonnières très cohérentes ont été mises en évidence dans les séries temporelles des différentes composantes. La comparaison locale des déformations de la croûte terrestre se traduisant par des variations d'altitude issues des données laser montre une cohérence avec les mesures d'un gravimètre absolu transportable (FG5). Des signaux de même amplitude ont été observés par GPS. Ces variations sont également mises en évidence à l'échelle mondiale et leur interprétation géophysique est due à la combinaison des effets de marées terrestres et polaire et des effets de charge atmosphérique.

ABSTRACT

The French Transportable Laser Ranging Station (FTLRS) is a highly mobile satellite laser ranging system unit weighing only 300 kg. This station, with on-site fast installation, is dedicated to the tracking of satellites equipped with retroreflectors. The are fascinating uses in the geosciences for such a system: precise positioning, oceanography, time transfer, terrestrial reference frames, orbitography... The idea is to use a very small 13 cm diameter telescope installed on a high precision motorised theodolite, a laser also compact, and an avalanche photodiode which makes the detection possible at a single photoelectron level. It started its operational phase during a probatory experiment in Corsica in late 1996, but instabilities in quality of the signal were exhibited. This work deals first with the FTLRS changes directed toward increasing the station's accuracy to reach the 1 cm level and participate to the calibration/validation campaign of the oceanographic mission JASON-1 (2001). Then, the instrumental precision is checked with laboratory experiments and the results are quite satisfactory regarding the improvement efficiency.

Another aspect of this work concerns an analysis developed in order to estimate the new accuracy and stability of the FTLRS after technical changes. Based on a collocation experiment between the two fixed laser ranging stations of the OCA, the method consists in station coordinates and mean instrumental bias adjustments from LAGEOS reference orbits. The temporal series of this precise positioning evidence seasonal variations. A local comparison of the altitude variations with laser positioning, permanent GPS receiver and absolute gravimeter measurements is performed. These temporal variations are exhibited at a world scale (other laser stations) and their geophysical interpretation deals with terrestrial and polar tides and atmospheric loading effects.

