

## Les mesures de télémétrie laser et le contrôle de leur qualité

Joëlle NICOLAS

### Principe de la mesure

La télémétrie laser sur satellites est une technique de géodésie spatiale basée sur la mesure très précise (à environ 50ps) du temps de vol aller-retour d'impulsions lumineuses brèves entre une station au sol et un satellite, équipé de rétroreflecteurs, en orbite autour de la Terre.

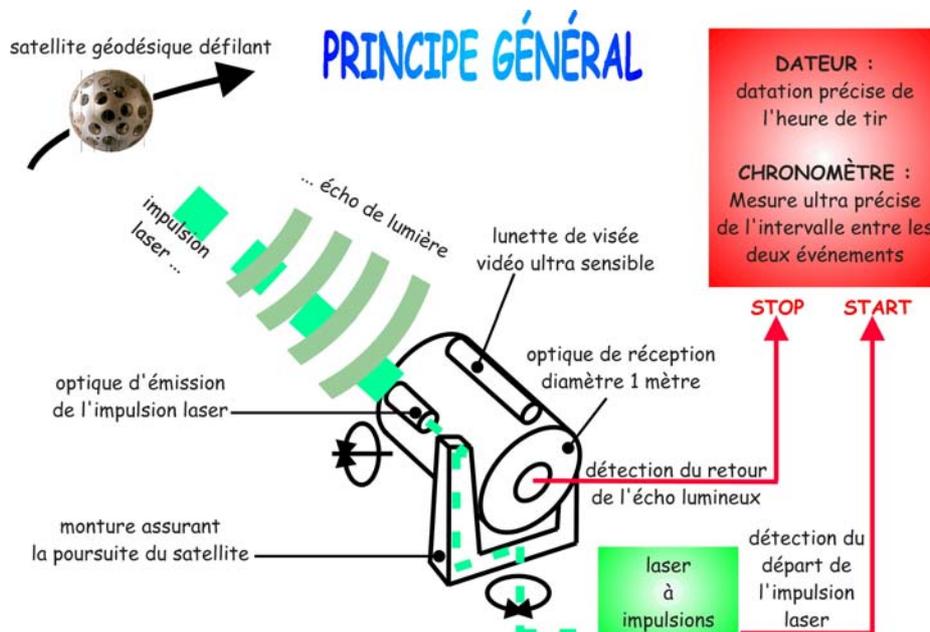
Connaissant la vitesse de propagation de la lumière, la distance entre la station et la cible est alors déduite. Compte tenu de la mobilité des cibles, il faut disposer d'un point de référence fixe quelque soit la position du télescope. C'est pourquoi, par convention, toutes les distances sont données par rapport à la croisée des axes du télescope.

### Aspect instrumental

Une station de télémétrie laser doit être constituée des éléments suivants:

- un laser pour produire les impulsions lumineuses brèves,
- une chaîne de chronométrie pour dater (à 100ps) les événements et mesurer le temps de vol,
- une référence de temps et de fréquence (asservissement du chronomètre),
- un collecteur de lumière pour recueillir les photons provenant de la cible, ayant une grande mobilité et une bonne qualité de pointage (<10"),
- un détecteur de lumière sensible,
- un ensemble informatique pour piloter la station, acquérir les données et réaliser leur pré-traitement.

Chaque élément constitutif joue un rôle déterminant sur la qualité finale des mesures. C'est pourquoi il faut limiter au maximum à chaque niveau les erreurs introduites par l'instrumentation. Parmi les éléments clés pour la précision des mesures, nous allons évoquer les points suivants : détection, étalonnage, cibles, correction atmosphérique.



Tout d'abord, en ce qui concerne le détecteur de départ, qui envoie un signal au dateur et qui déclenche le chronomètre, il doit être rapide et avoir un temps de réaction très stable afin d'obtenir une datation toujours aussi précise du départ des impulsions laser.

Le détecteur de retour, point plus critique pour la précision des données, doit être à la fois le plus sensible et le plus rapide possible. Il faut que le temps de transit (temps entre l'arrivée des photons et la sortie du signal) soit le plus stable possible quelque soit le nombre de photons tout en ayant la capacité de détecter seulement quelques photons. Au niveau du détecteur de retour, il est également nécessaire de limiter le bruit tant interne qu'externe. Pour ce faire, le photodétecteur est refroidi et on utilise un système de filtrage spatial, spectral et temporel, ce dernier consistant en une sensibilisation du détecteur de retour uniquement ~200ns avant l'arrivée prévue des photons.

Afin de prendre en compte les délais interne variables liés à l'instrumentation (température, réglages, azimut, hauteur ...), des mesures d'étalonnage sur cible fixe sont indispensables, positionnée par d'autres méthodes avec grande précision (qq mm), sont indispensables. Ces mesures peuvent être effectuées, selon les stations, en temps réel ou après chaque passage de satellite.

Il faut également considérer la qualité et la disposition (sphère, plan, couronne, polyèdre) des réflecteurs laser sur les cibles spatiales. Pour ce faire, il faut modéliser une correction optique (signature des satellites), une correction de centre de masse ainsi que le bilan de liaison i.e. la réponse impulsionnelle soit le nombre de photons revenant de la cible.

Enfin, il ne faut pas négliger l'effet de l'atmosphère qui induit un ralentissement de la propagation ainsi qu'une courbure du trajet du faisceau lumineux. Pour ce faire on utilise le modèle de Marini-Murray qui fournit l'indice de réfraction en fonction de paramètres météorologiques au sol (pression atmosphérique, température, taux d'humidité) et de la longueur d'onde du laser. Cette correction dépend également de la quantité d'atmosphère traversée c'est-à-dire de l'élévation du satellite.

A ce niveau on peut dresser un bilan d'erreur pour la station de télémétrie laser sur satellites fixe du site de Grasse (7835). La précision instrumentale peut être évaluée à environ 5-13mm et celle de la mesure à environ 12-16mm, en tenant compte de l'atmosphère. Ce bilan d'erreur peut être décomposé de la manière suivante :

- datation de l'heure de tir (100ns soit mieux que 1mm sur la position du satellite)
- chronométrie du temps de vol aller-retour (10-20ps soit 2-3mm)
- détecteur (15-70ps soit 2-10mm)
- étalonnage de la station (précision de 2mm, exactitude de 5mm)
- signature du satellite (quelques mm à quelques cm)
- atmosphère (<10mm).

### **Contrôle de la qualité des mesures**

Au niveau des stations, on peut contrôler le pré-traitement des données avant l'envoi aux bases de données internationales. Pour ce faire on peut regarder par exemple l'histogramme des résidus (distance observée moins distance calculée à partir d'une orbite de prédiction et des coordonnées de la station) ainsi que l'écart-type des mesures, passage par passage, avec éventuellement un retraitement. Par exemple dans le cas de Topex/Poséidon, un écart-type de l'ordre de 2-2,5cm sur les mesures est un indicateur de la disposition, en forme de couronne, des réflecteurs laser. Si on obtient un écart-type de l'ordre du centimètre, on retraite puisque cela ne correspond pas à la signature attendue du satellite.

On peut également contrôler l'instrumentation. Pour ce faire on contrôle l'évolution de la valeur d'étalonnage et de son écart-type, d'un passage à l'autre. On procède aussi, régulièrement, à des vérifications métrologiques (max. 1/an) et, occasionnellement (tous les 2-3 ans), au raccordement de la croisée des axes aux repères locaux et à la vérification des distances des cibles externes.

Après analyse des données on peut procéder à différents types de contrôle sur la qualité des mesures. Tout d'abord au niveau global à partir des orbites des satellites LAGEOS 1 et 2 (6000km d'altitude), on peut ajuster des coordonnées de station ainsi qu'un biais instrumental moyen, c'est-à-dire une erreur systématique sur les distances mesurées. Pour ce faire, il semble qu'un minimum de 3 mois de données avec 1000 points normaux (un point normal est une manière de condenser l'information) bien répartis dans l'espace soit

nécessaire. Au niveau régional, par la méthode d'arcs courts, on peut par exemple améliorer une orbite, si nécessaire ou bien faire le calcul des coordonnées de la station, et en particulier son altitude. Enfin au niveau local, on peut procéder à des expériences de co-localisation entre plusieurs stations laser mais aussi entre différentes techniques de géodésie spatiale.

Ce type d'expérience est menée à Grasse depuis novembre 1997. En effet, les deux stations laser fixes (satellites et Lune) observent en commun les satellites LAGEOS 1 et 2. L'analyse de ces données, par périodes de trois mois, a été réalisée pour l'année 1998 à partir des orbites de LAGEOS. Des calculs complètement indépendants entre les deux stations ont conduit à des résultats très cohérents en ce qui concerne le rattachement entre les deux stations ( $<5\text{mm}$ ) et les variations saisonnières des coordonnées. Un biais annuel moyen a également été estimé pour les deux stations laser. Il est de  $(-4.5 \pm 0.7)\text{mm}$  pour le laser satellites et de  $(0.6 \pm 1.1)\text{mm}$  pour le laser Lune. Dans le cas du laser Lune, il faut mentionner le fait que ce type d'expérience est très important, puisqu'il s'agit d'évaluer un nouveau mode de fonctionnement de cette station et de faire le lien entre deux repères de référence. De plus fin 1997, un biais instrumental de  $9.87\text{cm}$  avait été trouvé pour la station laser Lune puis réajusté après vérification expérimentale au niveau millimétrique sur la station. Ce type de résultat montre la force de ce type d'analyse.

En ce qui concerne les variations saisonnières d'altitude, elles ont été comparées aux mesures de gravimétrie absolue ainsi qu'aux mesures du GPS permanent. Il y a un très bon accord entre les mesures gravimétriques et les solutions laser, mais il apparaît un léger désaccord avec GPS. Ce genre d'expérience de co-localisation est très intéressant et sera poursuivi en 2000 en rajoutant les données de la station laser ultra mobile.

## **Conclusion**

Les applications géodésiques des mesures de télémétrie laser nécessitent l'existence d'un réseau international. Cependant les stations sont de différents types et ont des modes de fonctionnement différents, ce qui apporte certes une richesse liée aux différences de technologie mais surtout de grandes difficultés d'analyse. Il est donc indispensable de disposer d'une très bonne coordination internationale. A ce niveau, il faut noter qu'il y a eu d'énormes progrès au niveau de cette collaboration depuis la création de l'International Laser Ranging Service (ILRS) en 1998. Ce service joue un rôle important et a permis le développement d'échanges d'informations entre les stations et les centres d'analyse, d'un contrôle plus systématique des biais et coordonnées de stations ainsi que le début d'un système de communication en temps réel au cours des observations entre stations (au niveau régional). Il faut également mentionner le colloque qui a eu lieu à Florence au mois de septembre 1999 au cours duquel a été réalisée une revue systématique de tous les paramètres influençant la qualité des mesures.