

TRANSFERT DE TEMPS PAR LIEN LASER (PROJET T2L2 : OCA / CNES) :

CARACTERISATION DES BRUITS INSTRUMENTAUX ET UTILISATION POSSIBLE POUR L'ORBITOGRAPHIE DU SATELLITE JASON-2.

Société d'accueil : Observatoire de la Côte d'Azur (OCA) / UMR 7526

PFE présenté par : **Mathieu MAZUEZ**

Directeur du PFE : Pierre EXERTIER

Correcteurs : Gilbert FERHAT

Pascal BONNEFOND



Introduction

Les systèmes ou techniques de géodésie spatiale actuels contribuent fortement à l'estimation (en temps réel ou différé) de la trajectoire de nombreux véhicules spatiaux et en particulier celle des missions d'observation de la Terre.

Le satellite Jason-2 (lancé le 20 juin 2008) porte à son bord, pour la première fois, un "récepteur laser" actif en plus d'un classique rétro-réflecteur, qui est passif, souvent utilisé à bord des missions spatiales. Il est ainsi possible de réaliser des Transferts de Temps sol-bord en corrélant les dates des impulsions laser émises depuis le sol par les stations laser et les dates d'arrivée à bord du satellite de ces impulsions.

Le technique de Transfert de Temps optique utilisée est développée conjointement par l'Observatoire de la Côte d'Azur, où j'effectue mon Projet de Fin d'Etudes, et le CNES.

De cette manière, il est possible de calculer des correspondances ponctuelles entre l'horloge bord du satellite et l'horloge sol de la station. Ainsi, l'objectif est d'évaluer la possibilité de contrôler l'Oscillateur Ultra Stable (OUS DORIS) embarqué à bord à moyen terme, c'est-à-dire jusqu'à plusieurs milliers de secondes, ce qui correspond à plusieurs révolutions du satellite Jason-2.

L'orbitographie de Jason-2

Jason-2 est un satellite d'observation qui répond à la demande des programmes internationaux d'étude et d'observation des océans et du climat visant à la mise en place d'un système d'observation des océans à l'échelle de la planète. Depuis 1992 et les missions Topex/Poséïdon et Jason-1, l'altimétrie, c'est-à-dire la mesure précise de la topographie de surface des océans, s'est imposée comme un outil indispensable pour l'étude des océans à l'échelle du globe.

A ce titre, l'orbite de Jason-2 est calculée grâce à trois systèmes différents :

- le système de radio-positionnement DORIS,
- le GPS,
- la télémétrie laser.

Par conséquent, les systèmes de localisation à bord de Jason-2 se complètent pour permettre une mesure estimée à ± 2 cm près de la position du satellite sur son orbite (distance radiale Terre-satellite).

Contribution envisagée à l'orbitographie de Jason-2

Classiquement, c'est la télémétrie laser deux-voies (réflexion de l'impulsion laser sur un réflecteur) qui contribue à la l'orbitographie du satellite par mesure du temps de vol.

Comme Jason-2 embarque l'instrument T2L2 composé d'un compteur et utilisant l'OUS DORIS pour dater les événements bord, il est envisageable de faire de la télémétrie dite "une voie" (figure 1).



Figure 1 : Schéma de la télémétrie une voie

Pour parvenir à nos fins, il est nécessaire de convertir la valeur de compteur bord dans le système de temps sol grâce à un modèle contraint par les "remises à l'heure" obtenues par la technique de Transfert de Temps optique T2L2, pour *Time Transfert by Laser*.

Le Transfert de temps T2L2

L'expérience T2L2

L'expérience de Transfert de temps T2L2 est au coeur du Projet. Le principe de l'expérience a été imaginé dans les années 70 puis validé par l'expérience LASSO embarquée sur Meteosat-P2 avant que le projet se concrétise à bord de Jason-2.

Son principe repose sur trois éléments qu'on nomme "triplet T2L2" (figure 2) :

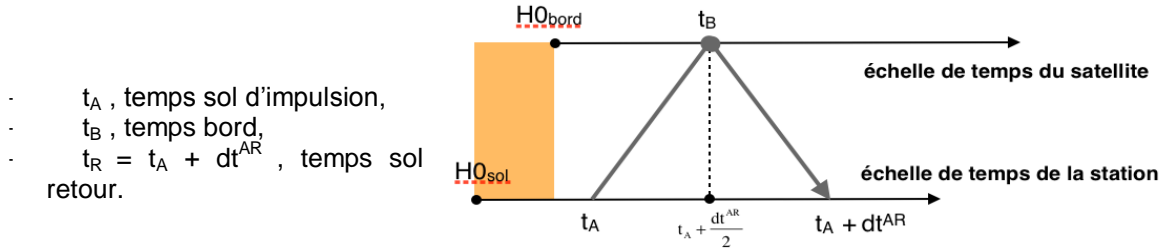


Figure 2 : Principe de la méthode de Transfert de Temps T2L2

On a donc un décalage, entre les deux échelles de temps, $\chi_{AS} = t_B^{UTC} - t_B^{OUS}$ équivalent à :

$$\chi_{AS} = t_A + \frac{dt^{AE}}{2} - t_B^{OUS} + \tau_{relativité} + \tau_{atmosphère} + \tau_{calibration}, \text{ avec } \tau \text{ les corrections :}$$

- l'effet Sagnac qui traduit le fait que le trajet retour suivi par le rayon laser n'est pas exactement le même que celui du trajet aller du fait de la rotation de la Terre,
- d'autres effets relativistes dus au potentiel gravitationnel solaire,
- l'effet de l'atmosphère sur le trajet et la vitesse du rayon lumineux.

On a ainsi une correspondance $t_B^{OUS} \rightarrow t_B^{UTC}$, ce qui permet de "remettre à l'heure" (dans le référentiel de référence de la station sol, qui est une réalisation du Temps Universel Coordonné UTC).

L'instrument T2L2

L'instrument T2L2 a été caractérisé par Patrick Vrancken par des bancs de tests au sol, il tire partie de l'Oscillateur Ultra Stable (OUS) DORIS déjà présente sur Jason-2.

Les spécifications de l'OUS et les tests donnent une stabilité satisfaisante pour T2L2 de l'ordre de 1 picoseconde à court terme (moins de 10 secondes).

Le segment sol et les mesures

Les stations participantes font parties du réseau de l'ILRS (International Laser Ranging Service). Les données sont récupérées quotidiennement depuis les centres de données de l'organisation (CDDIS, USA et EDC à Munich) pour corrélation entre les dates des impulsions lasers et les dates d'arrivée à bord. A l'OCA, Pierre Exertier et Claude Froussard travaillent au traitement informatique des données T2L2.

Le temps sol est le temps réalisé par la station laser qu'on suppose être une réalisation de l'UTC en fréquence (il y a en effet un décalage en phase d'où l'intérêt des transferts de temps sol→sol).

Expérimentation sur l'OUS DORIS

L'équation de transfert de temps est la suivante :

$$\left[t_i^{sol} + \frac{dt_i^{AR}}{2} + \tau \right] - [t_i^{bord}] = f^n(t_i) = a * t_i^2 + b * t_i + c + \text{résidus}$$

avec $\frac{dt_i^{AR}}{2} = \left(\frac{dt_i^{AR} - \text{Sagnac}}{2} \right) - LRA_NL$, $LRA_NL = dt(\text{point du LRA} - \text{point de la voie non linéaire})$

Je choisis un polynôme de degré 2 pour définir $f_n(t_i)$, car l'OUS DORIS dévie en $t\sqrt{t}$ par rapport au temps de référence, qu'on suppose proche du temps dit UTC délivré par l'horloge de la station sol.

Téléométrie laser

J'ai d'abord commencé par faire une étude de la télémétrie laser (deux-voies). Le but de cette étude est d'obtenir un bilan par station de l'erreur sur $\frac{dt_{AR}}{2}$ qui est au centre de l'équation de transfert de temps.

On distingue ainsi trois types de stations, celles donnant un écart-type compris entre [3 ; 12] , [15 ; 30] et [40 ; ∞] mm.

Format : les stations peuvent fournir leurs données de datation du départ de l'impulsion laser sous deux formes de format. Le format MERIT-II fournit des dates avec une résolution de 100 ns, le format CRD fournit des dates à 1 ps. Les stations travaillant avec le premier ne m'intéressent pas puisque la résolution outrepassse les autres bruits de l'expérience.

Les différences observées entre stations proviennent essentiellement des erreurs instrumentales de détection à l'émission et à la réception, la datation du pulse laser et la prise en compte de la largeur du pulse.

Transfert de Temps

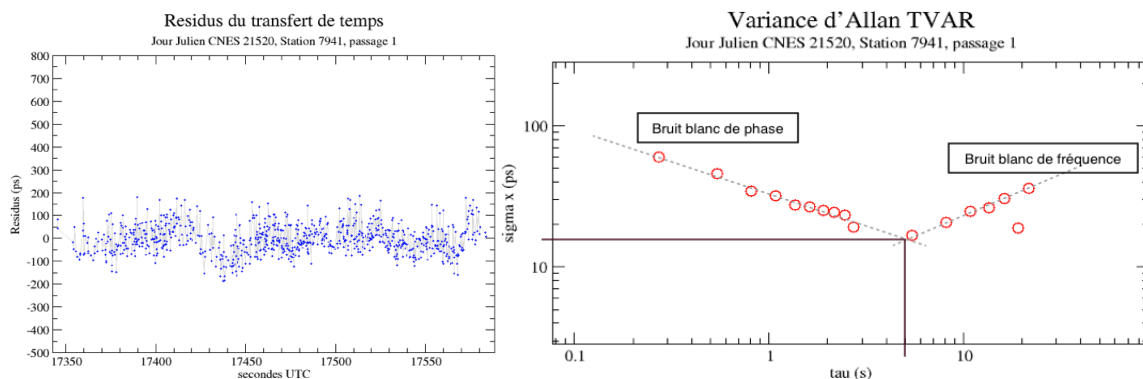
Les transferts de temps sol→bord sont réalisés pour les passages des stations utilisant le format CRD (résultats en tableau 1 et représentation des résidus pour un passage particulier figure 3a) :

Num.	Localisation	Format	Type	Transfert de Temps de JJ 21458 à JJ21588		
				Nb de passages	Moy (ns) des σ	EcT (ns) moyen des σ
7237	Changhun, China	CRD	Maser H, parfois ?	38	1,15	1,01
7810	Zimmerwald, Switzerland	CRD		171	24,7	0,9
7825	Mt Stromio, Australia	CRD		72	1,82	0,85
7840	Herstmonceux, UK	CRD		146	2,94	1,54
7845	Grasse, France (Méo)	CRD	Césium	16	0,33	0,52
7848	Ajaccio, France (FTLRS)	CRD	Rubidium	55	2,38	0,75
7941	Matera, Italy	CRD	Maser H	17	0,11	0,07
8834	Wetzell, Germany	CRD depuis nov.2009	Maser H	93	0,17	0,15

Tableau 1 : Transfert de temps sol/bord, synthèse par stations

Les résultats soulignent l'importance du type d'horloge utilisée au sol. En effet, les Maser à Hydrogènes, présents aux stations 7941 de Matera (Italie) et 8834 de Wetzell (Allemagne) fournissent les meilleurs résultats en terme de précision or on sait que ces horloges atomiques ont la meilleur stabilité à court terme. La station 7845 de l'OCA installée au plateau de Calern fournit également de bonnes performances comparativement aux autres ; cette station utilise une horloge à jet de Césium, un peu moins stable.

On peut étudier la stabilité des transferts de temps à l'aide de la variance d'Allan temporelle (TVAR). J'ai mesuré une stabilité maximale de 11 ps sur 5 s d'intégration (figure 3b).



Figures 3a et 3b : Résidus du transferts de temps et application de TVAR pour le premier passage du Jour Julien 21530 de la station 7941

Bilan d'erreurs

Le bilan d'erreur associé à l'équation de transfert de temps s'écrit (Weick & Samain [2007]) :

$$\sigma_{Station-Satellite}^2(\tau) = \frac{\sigma_{Départ}^2(\tau)}{4} + \frac{\sigma_{Retour}^2(\tau)}{4} + \sigma_{Bord}^2 + \sigma_{Atmosphère}^2 + (\sigma_{Relativité}^2 + \frac{\sigma_{Calibration}^2}{4})$$

(les deux derniers termes sont négligeables). On retrouve le $\frac{dt_{AR}}{2}$ (les deux premiers termes) dont le bilan a été fait précédemment. En plus de ça, il faut prendre en compte les bruits électroniques des horloges et l'effet de l'atmosphère. La

variance d'Allan permet de mettre en évidence les différents types de bruits selon la pente (figure 3b). Les résultats précédents (dont la figure 3a est un exemple) sont fortement sujets à ces bruits.

Transferts de Temps sol/sol

Cinq passages communs du satellite sont disponibles entre les trois stations sélectionnées. Il est donc possible d'expérimenter quelques transferts de temps sol/sol et de vérifier si on atteint les performances théoriques escomptées suite aux bancs de tests conduits par Patrick Vranken. Je mesure des transferts de temps sol→sol avec un écart-type de 100 à 650 ps. Cependant, la non continuité des mesures disponibles (inhérentes à la réalisation pratique de l'expérience) ne permet pas d'évaluer la stabilité du transfert de temps sol→sol .

Suivi de l'OUS

Le contrôle de l'OUS DORIS à mieux que 100 ps (équivalent à 3 cm parcourus par l'impulsion laser, seuil intéressant au niveau de l'orbite de Jason-2) est par conséquent très délicat. Il parait en premier lieu nécessaire d'appliquer une correction en fonction de l'énergie.

Les pps (*pulse per second*) émis par le système GPS et datés à la microseconde nous permettent une première approche du comportement de l'OUS (figure 4a) :

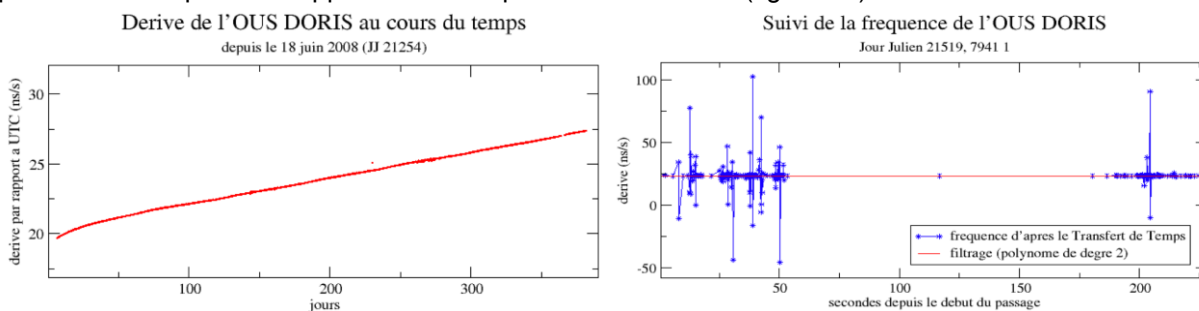


Figure 4a et 4b – Appoints de fréquence de l'OUS par rapport à l'UTC

à gauche : à grande échelle, obtenus avec les pps du système GPS

à droite : à une échelle beaucoup plus petite, obtenu avec les transferts de temps

J'ai essayé ensuite de suivre plus finement la dérive en fréquence délivrée par l'oscillateur DORIS grâce aux transferts de temps (figure 4b), afin de créer un modèle de conversion $t_{Bord}^{OUS} \rightarrow t_{Bord}^{UTC}$ que je confronte ensuite à un autre transfert de temps enregistré lors d'un passage commun à deux stations (figure 5). L'adéquation est contenue dans une bande de 5 ns pour les cinq passages communs enregistrés permettant de procéder à 10 expérimentations.

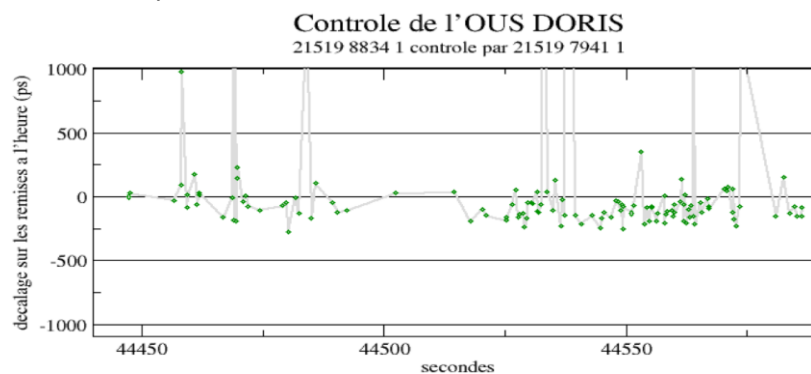


Figure 5 : Confrontation du modèle (21519 8834 1,) avec les remises à l'heure du modèle (21519 7941 1)

Conclusion

Les performances des horloges sols constituent un élément essentiel dans la précision des transferts de temps sol→bord, les Maser à Hydrogène délivrent les meilleurs résultats.

La performance de l'horloge bord (à moyen et long terme, c'est-à-dire à plus de 200 s) n'est pas suffisante pour atteindre la même précision de Transfert de temps que dans le cas d'une vue commune ; le contrôle de l'OUS DORIS à mieux que 100 ps (équivalent temps de vol de 3 cm, niveau intéressant pour l'orbitographie de Jason-2) n'est pas réalisable.