

# Test de l'isotropie de la vitesse de la lumière à partir du transfert de temps une voie par laser

Alexandre Belli, Pierre Exertier, Etienne Samain

CNRS-OCA-UCA-Géoazur

*belli@geoazur.unice.fr*



Observatoire  
de la CÔTE d'AZUR

UNIVERSITÉ  
CÔTE D'AZUR 

# Contexte relativiste

- La relativité restreinte et générale sont deux des théories importantes pour la métrologie
- L'invariance de Lorentz est le test de la SR, sur l'universalité de «  $c$  » qui est de nature cinématique
- Contexte théorique fourni par Mansouri & Sexl

*Mansouri, R., & Sexl, R. U. (1977). A test theory of special relativity: I. Simultaneity and clock synchronization. General relativity and Gravitation, 8(7), 497-513.*

- Théorie très bien testée, mais doit être testée avec autant d'exactitude que possible à grande échelle
- Deux repères : Laboratoire (Terre, S) par rapport à  $\Sigma$ , représenté par le fond diffus cosmologique (CMB)
- Le test vise à déterminer une quantité mesurable qui « dépend » de l'orientation ( $\theta$ ) de (S) dans ( $\Sigma$ ) :

$$c(\theta, v) = c \left[ 1 - \frac{(1+2\alpha)v}{c} \cos \theta + \mathcal{O}(c^{-3}) \right] \quad (0)$$

Vitesse de la Terre  
Orientation

- L'idée est de tester  $\frac{\partial c(\theta, v)}{c}$  avec l'aide de la télémétrie laser une voie et du transfert de temps entre deux horloges
- Transfert de Temps par Lien Laser (T2L2)

# Contexte spatial (T2L2)



## T2L2 + LRA

Transfert de Temps par Lien Laser

**Jason-2**, satellite océanographique :

- Lancé le 20 juin 2008
- À 1336 km d'altitude
- Orbite inclinée de 66°
- Période orbitale ~110 min

**Passagers :**

- LPT
- CARMEN-2

*Bezerra, Fet al. 2011. Carmen2/mex : An in-flight laboratory for the observation of radiation effects on electronic devices. In Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS).*

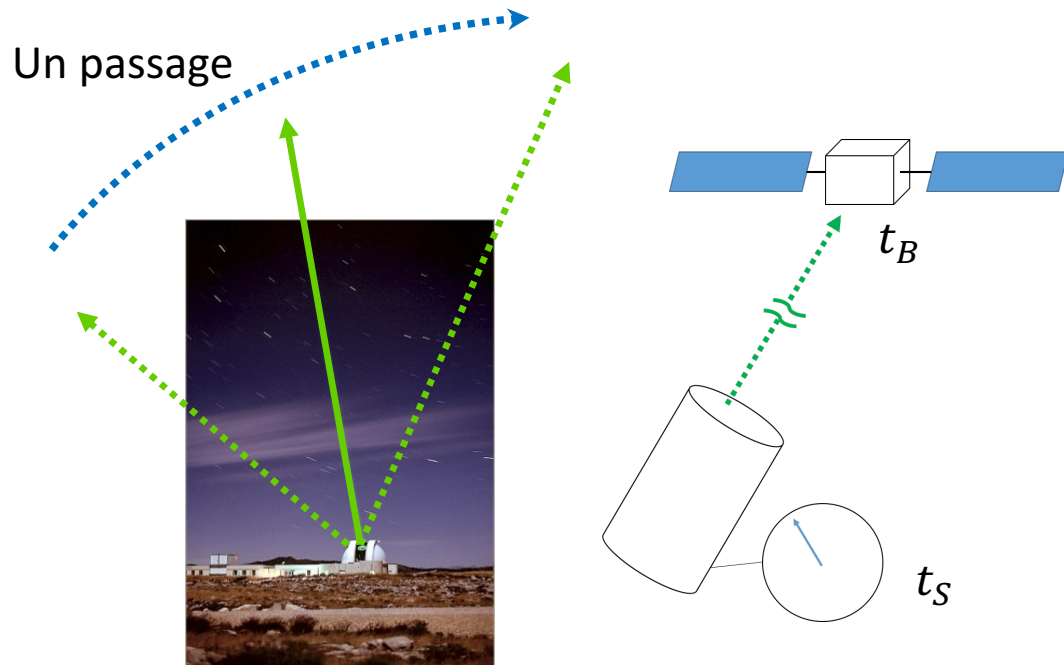
- T2L2

*Samain, E., et al. 2008. Time transfer by laser link-the t2l2 experiment on jason-2 and further experiments. International Journal of Modern Physics D.*

# Le transfert de temps une voie par laser

- T2L2 permet de faire du transfert de temps **1 et 2 voies** par lien laser
- Le transfert de temps 1 voie permet la **synchronisation des horloges au sol dans les stations laser** et à bord Oscillateur Ultra Stable (OUS) utilisé comme standard de fréquence par la technique DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated on Satellite)
- Stabilité du transfert de temps est **de 6-8 ps @ 75 s**

*Exertier, P., et al. 2010. Status of the t2l2/jason2 experiment. Advances in Space Research. DORIS : Precise Orbit Determination and Applications to Earth Sciences.*



$$\Delta_S^B(t) = t_B - t_S + \Delta_S^B(t_0) + C + \Delta t$$

Transfert de temps Bord (B) – Sol (S)      Biais, à chaque passage

Temps datés à bord (B) et au sol (S)      Corrections relativistes

Corrections géométriques, instrumentales...

$$\Delta t = -\frac{1}{c^2} \int_0^T \left( \frac{1}{2} (v_B^2 - v_S^2) - (\phi_B - \phi_S) \right) + \delta v_{USO} dt + \frac{2\omega}{c^2} A_E$$

Vitesses de la station (S) et bord (B) (satellite)

Potentiel + aplatissement de la Terre (J2) à bord (B) et à la station (S)

Dérive de l'USO en fréquence

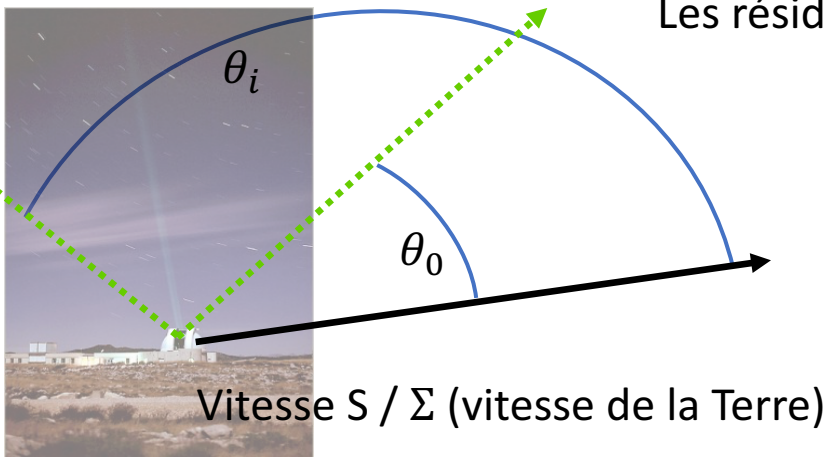
Effet Sagnac

# Méthodologie

- L'idée est de **comparer la différence d'horloge** (transfert de temps 1 voie) **avec la télémétrie laser**, pour chacune des directions ( $\theta_i$ ) d'espace pendant un passage
- Les résidus issus de cette comparaison sont projetés sur une direction privilégiées (vecteur vitesse Terre, dans le repère inertiel CMB) ; **le cumul par passage constitue le test de l'isotropie**, et la sensibilité de l'expérience est déduite de la dérivée partielle par rapport à  $\alpha$  de l'équation (0)

$$\left[ \{ \Delta_S^B(t) = t_B - t_S + \Delta_S^B(t_0) + C + \Delta t \}_{\theta_i} - \Delta t_{range, \theta_i} \right] = 0 \Leftrightarrow \Delta_S^B(t) = \Delta t_{range, \theta_i} \text{ et si } c \text{ invariant} \quad (1)$$

*Transfert de temps (différence d'horloges)*  
*Télémétrie laser (temporelle)*



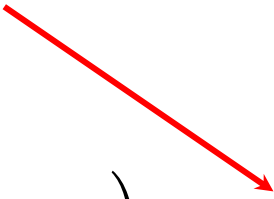
Les résidus (si l'équation (1) est différente de 0) contiennent :  $\delta c(\theta_i) + \text{Bilan d'erreur}$

Si  $c$  varie, i.e.  $c = c(\theta_i)$  alors pour deux directions d'espace :

$$\frac{\partial c}{c} \sim - \frac{2v_{Terre}}{c} (\cos \theta_i - \cos \theta_0) \text{ à partir de l'équation (0)}$$

# Bilan d'erreur

- On cherche un « éventuel » signal de quelques picosecondes (ps) sur un passage compte tenu du bilan d'incertitude sur la vitesse de la Terre, la direction privilégiée et la précision de nos observations
- Cumuler de nombreux passages au-dessus de stations laser, dans le but de réduire le bilan à quelques ps
- Erreur sur le range, incertitude sur la technologie laser (~10 ps)
- Erreur horloge au sol, la stabilité doit rester à 1 ps sur le passage
- Erreur horloge à bord, nécessite de modéliser les variations de la fréquence à bord (but : 10-15 ps)

$$\Delta t = -\frac{1}{c^2} \int_0^T \left( \frac{1}{2} (v_B^2 - v_S^2) - (\phi_B - \phi_S) \right) + \delta v_{USO} dt + \frac{2\omega}{c^2} A_E$$


- La stabilité de l'oscillateur à bord a une stabilité de  $3 - 5 \cdot 10^{-13}$  sur 10-100 s, se dégrade en  $\tau^{3/2}$
- Entraîne une instabilité à bord de 100-150 ps à 1000 s, insuffisant pour tester l'isotropie au niveau de  $\frac{\partial c}{c} \sim 10^{-9}$
- Le modèle de fréquence permet de diminuer cette instabilité

# Modéliser l'oscillateur (1/3)

Lecture de l'OUS par transfert de temps et relativité

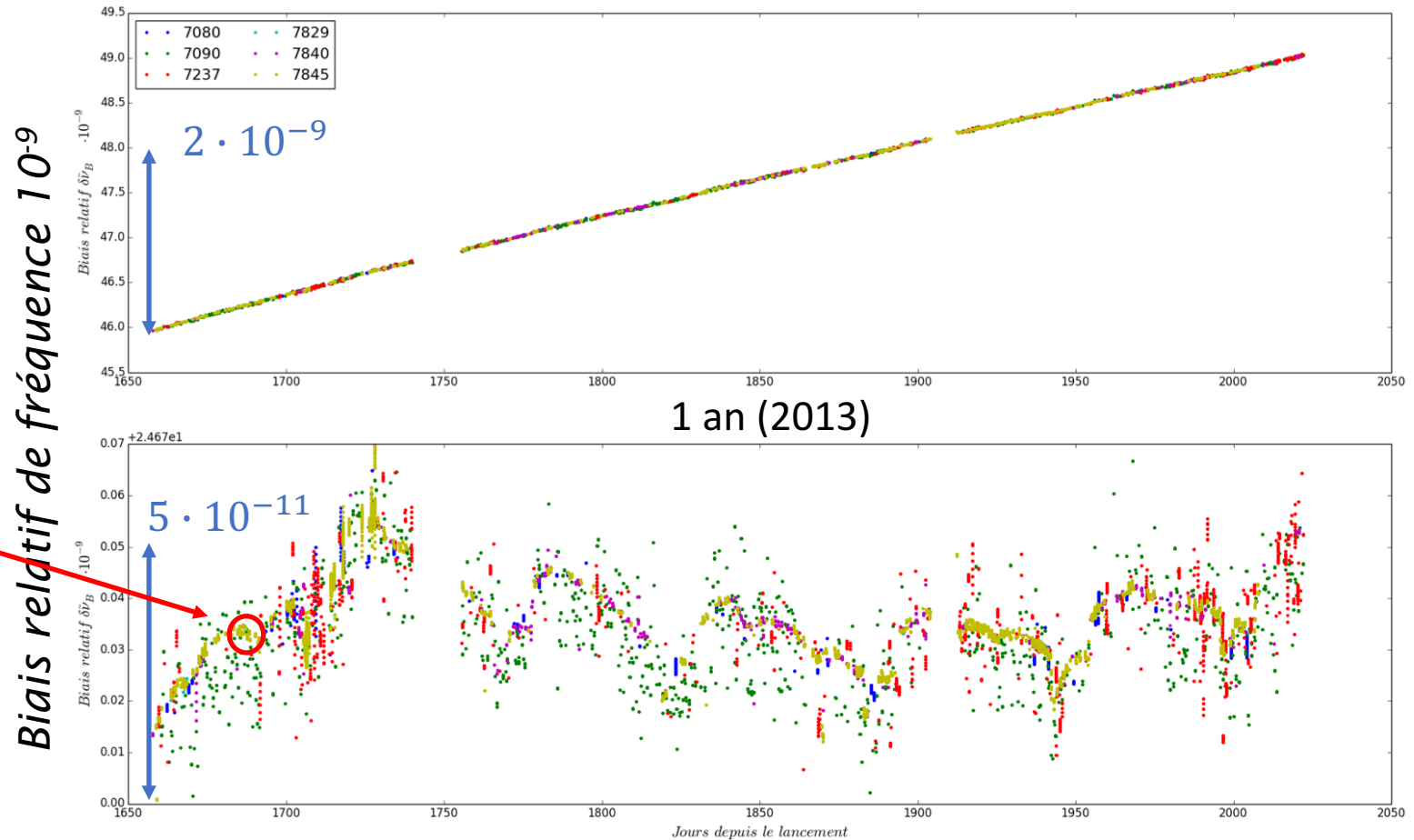
- La dérivation du transfert de temps sol espace permet de lire les variations de l'OUS à bord à quelques  $10^{-13}$

## Relativité :

- De 0 à 3000 m d'altitude pour les stations laser. Redshift gravitationnel
  - $1000\text{ m} \leftrightarrow 10^{-13}$
- Variation de l'orbite sur un passage :
  - $10\text{ km} \leftrightarrow 10^{-12}$

Modèle doit être valable sur 1 passage.

- Un passage = un point

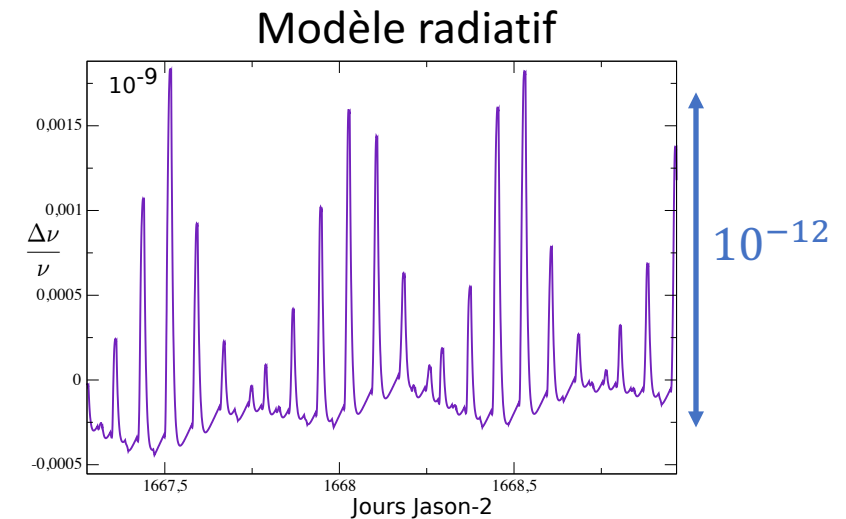
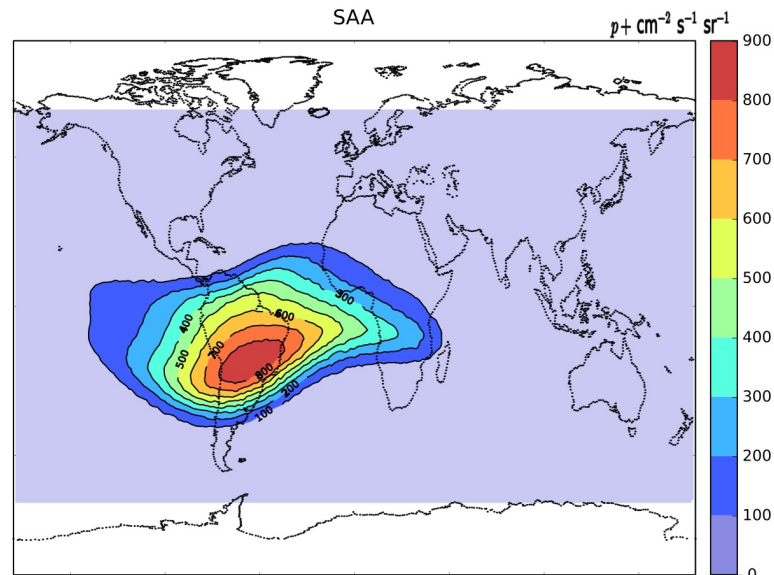
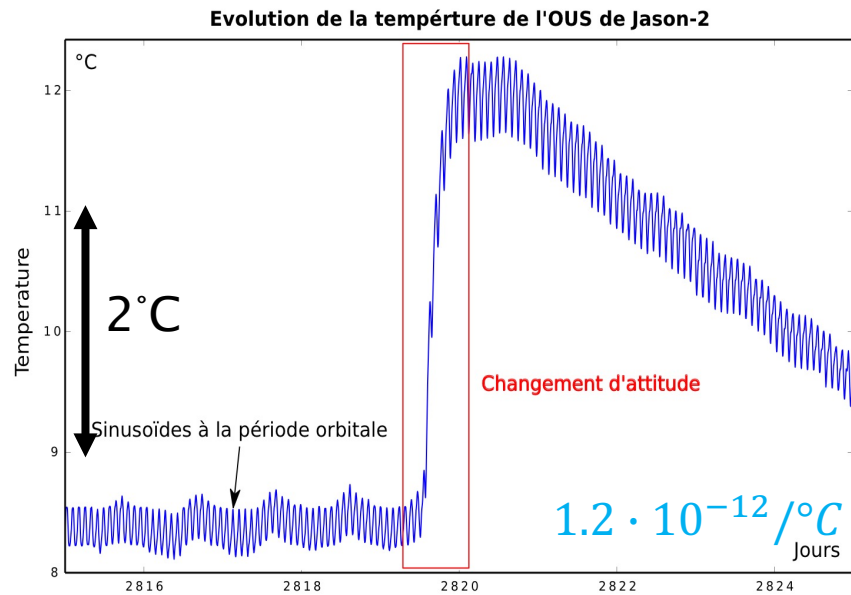


# Modéliser l'oscillateur (2/3)

## Température et radiations

- Nous avons développé un modèle **déterministe** basé sur les **effets physiques de l'environnement spatial**, température et radiation, qui **s'ajoutent aux effets relativistes**

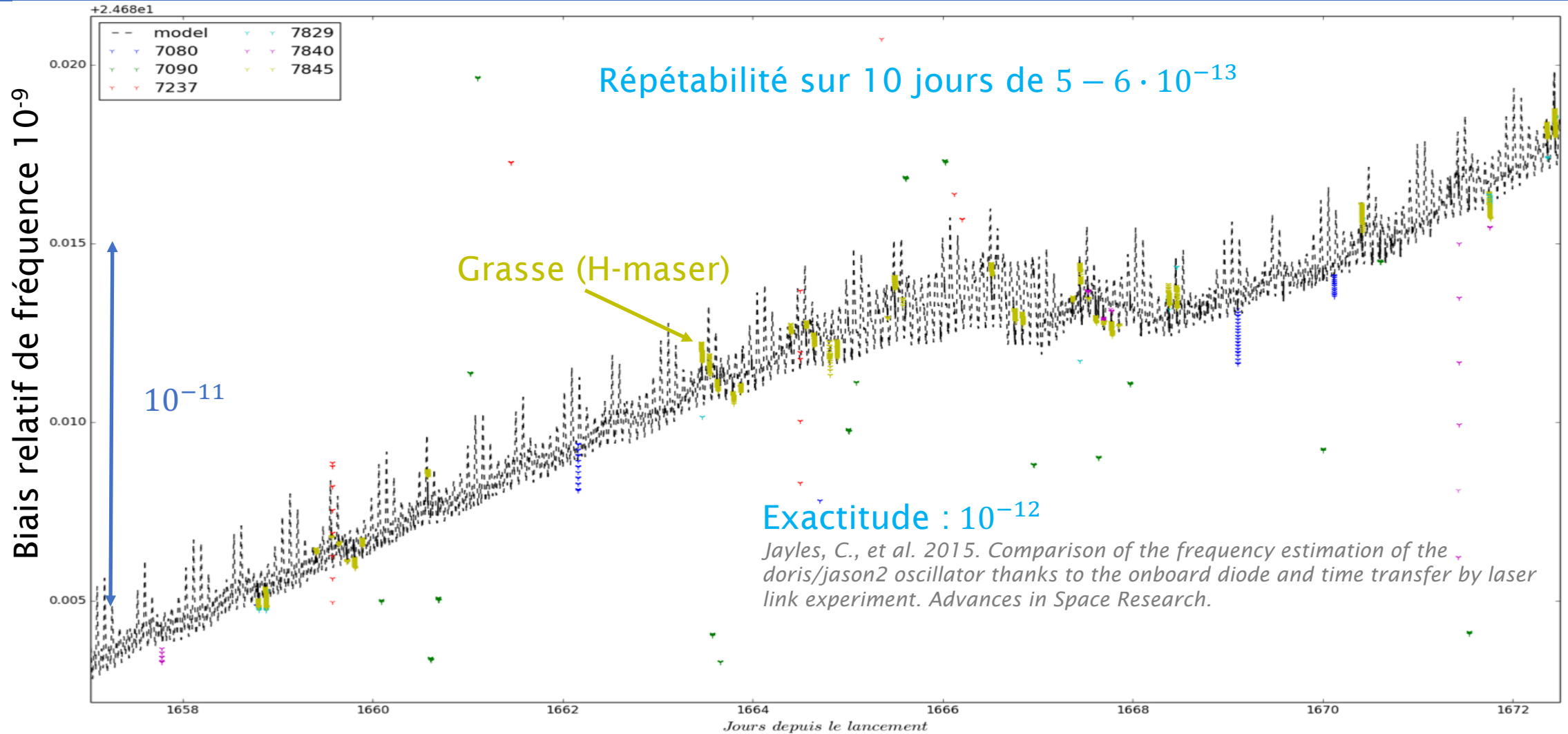
*Belli, A., et al. 2015. Temperature, radiation and aging analysis of the doris ultra stable oscillator by means of the time transfer by laser link experiment on Jason-2. Advances in Space Research. Scientific Applications of DORIS in Space Geodesy.*





# Modéliser l'oscillateur (3/3)

Modèle complet

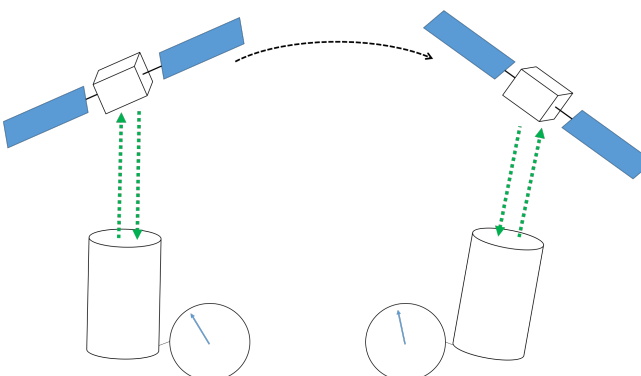


# Transfert de temps en vue non commune



Ephémérides pour le 16/02/2017

<http://www.geoazur.fr/t2l2/en/data/v4/>



*Transfert de temps en vue non commune :*

- Basé sur l'intégration du modèle
- 700 ps d'exactitude = inexactitude de fréquence de  $7 \cdot 10^{-13}$  @ 1000 s

# Conclusions et perspectives

## Conclusions

- On espère une estimation de  $\frac{\partial c}{c} \sim 10^{-9}$
- Le modèle de fréquence permet de **diminuer les instabilités à bord 100 - 150 ps à 10 - 15 ps sur un passage**
- **Rôle primordial de la relativité**, potentiel et vitesse du satellite ainsi que altitude des stations

## Perspectives

- LTT, à bord de Beidou
- LRO
- E-GRASP + new T2L2



Merci pour votre attention

*belli@geoazur.unice.fr*