



UFC
UNIVERSITÉ
DE FRANCHE-COMTÉ



**FIRST
TF**



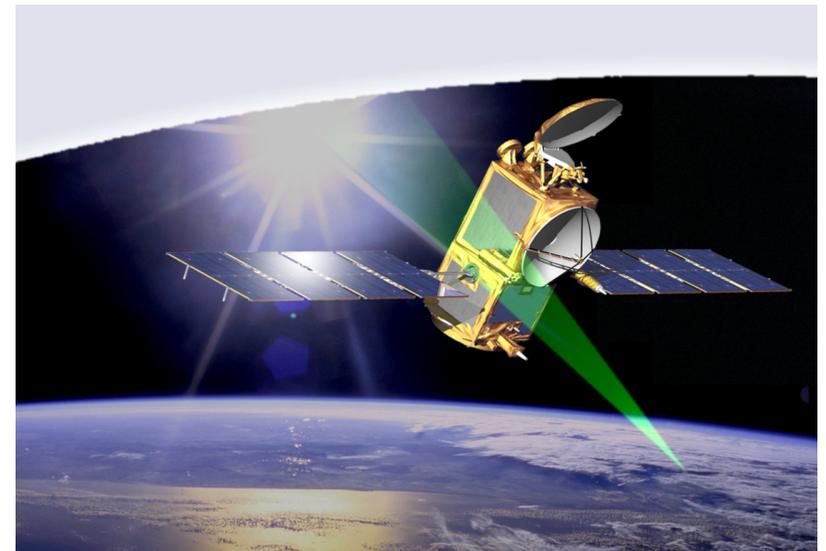
CENTRE NATIONAL D'ETUDES SPATIALES



Observatoire
de la CÔTE d'AZUR

Transfert de temps optique spatial, et applications

*Equipe AstroGeo, et collaborateurs
P. Exertier et al.*



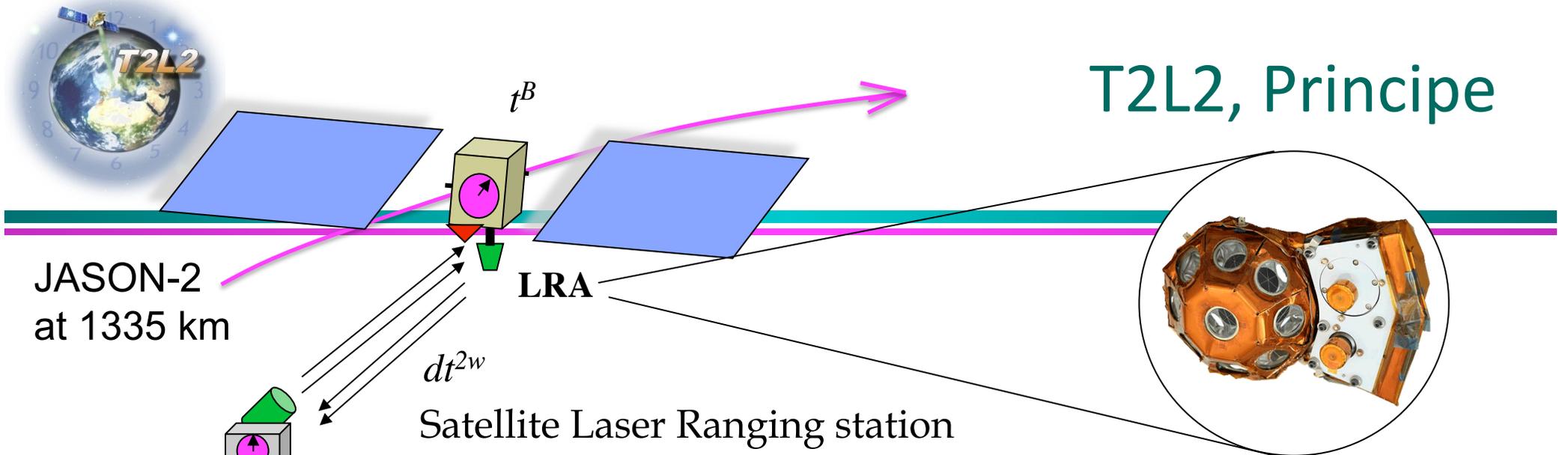
Journée AG Labex First TF, 16 mars 2015, Besançon



Introduction

- T2L2, lancé sur Jason 2 en juin 2008 pour une mission de 2 ans
- Rappels sur la mission
 - » Métrologique (performance, comparaison aux techniques GNSS, au sol)
 - » Scientifique (géodésie spatiale , physique fondamentale)
 - » Prolongations de 2010 à 2014, puis de 2015 à 2016
- Quelques résultats et applications
 - » Résultats métrologiques
 - » Applications scientifiques en cours
 - » Synergies : ELT, GRASP, géodésie relativiste

T2L2, Principe



JASON-2
at 1335 km

LRA

dt^{2w}

Satellite Laser Ranging station
and its reference clock

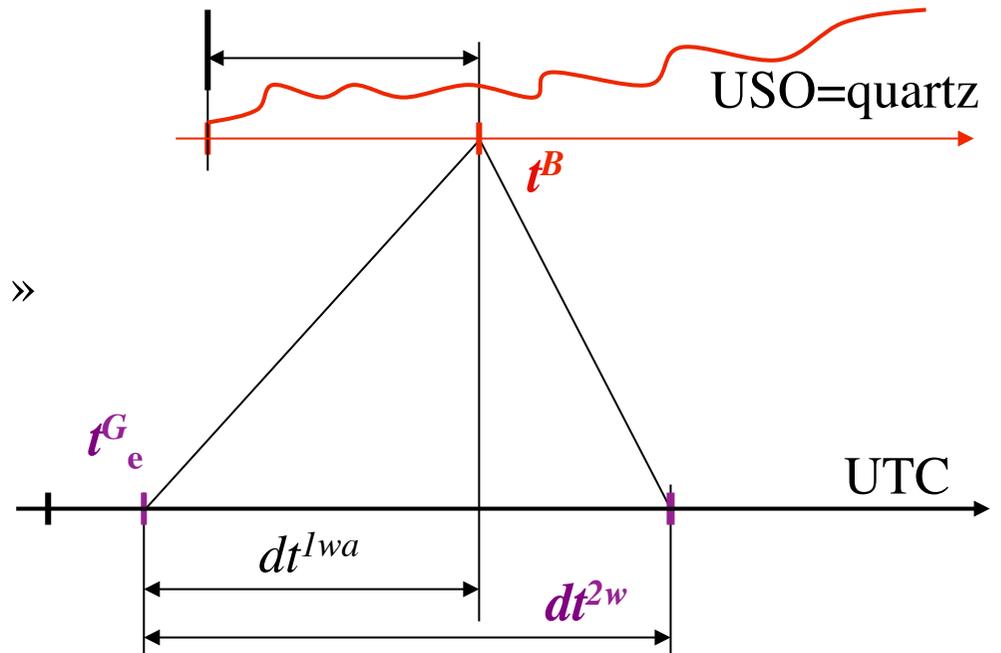
t_e^G

$$t_r^G = t_e^G + dt^{2w}$$

t_e^G, dt^{2w}, t^B : 3 measured quantities: « triplets »
(dt^{lwa} is computed from dt^{2w} / Sagnac correct.)

Fridelance et al., 1997; Samain, et al., 2008

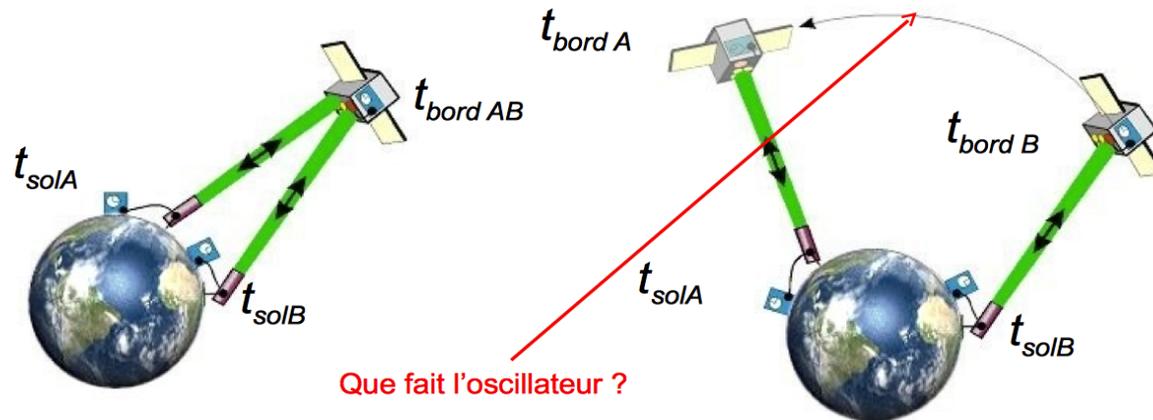
$$\Delta = t_B - \frac{t_e^G + t_r^G}{2} + \tau_{\text{Relativity}} + \tau_{\text{Intern-delays}} + \tau_{\text{Instrument}}$$





T2L2

Principe de la mission T2L2



Que fait l'oscillateur ?

- Deux grandes configurations
 - Vue Commune
 - Vue Non Commune
- Synchroniser les stations Laser
- Importance de Calern !
- Stabilité du transfert de temps de l'ordre de la picoseconde sur des intervalles de temps courts !

Courde et al., 2013; Exertier et al., 2010, 2014



Campagnes en Europe Laser vs. GNSS, 2013

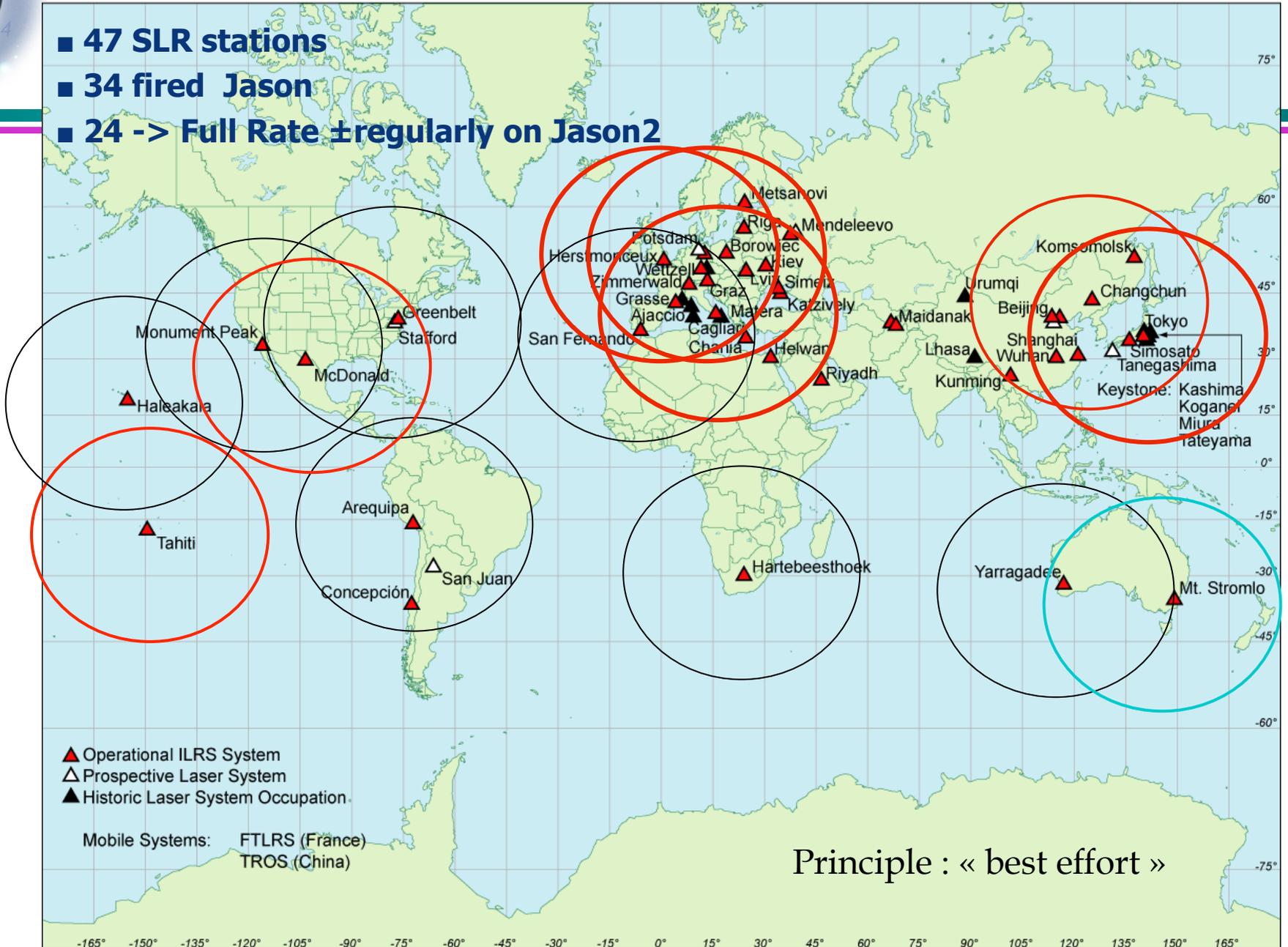


Rovera et al., 2014



Réseau laser de l'ILRS

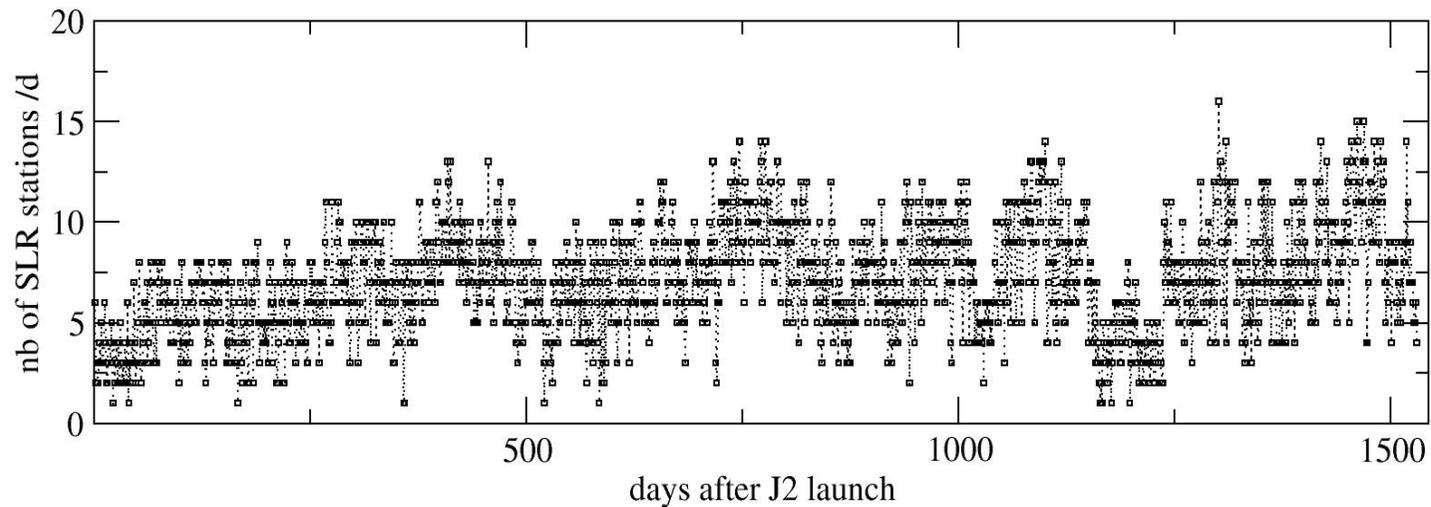
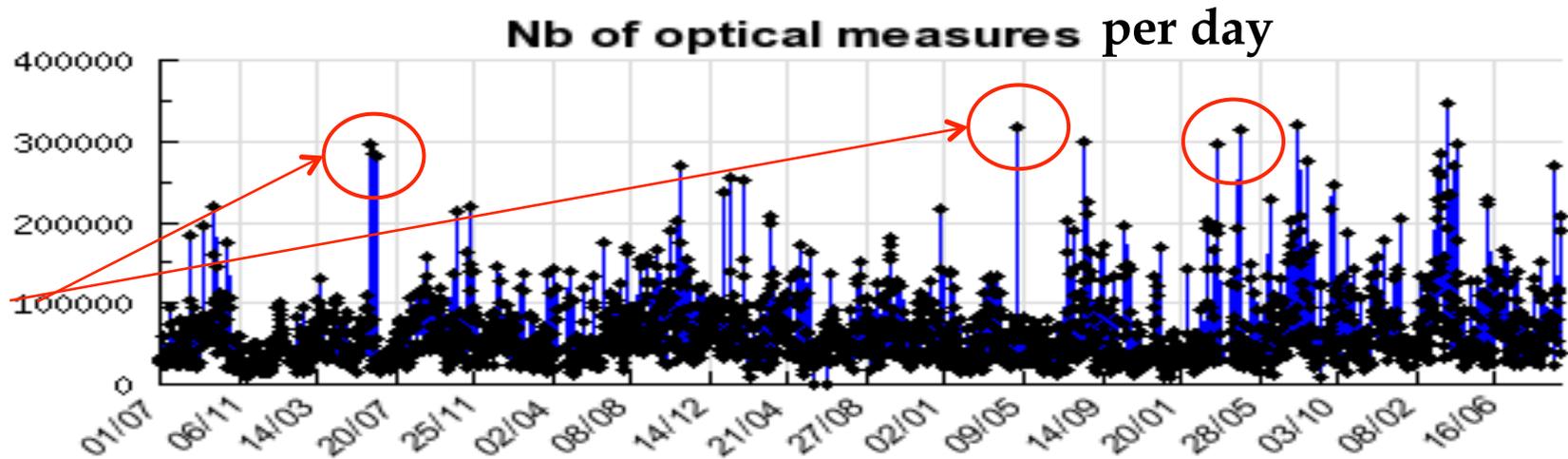
- 47 SLR stations
- 34 fired Jason
- 24 -> Full Rate \pm regularly on Jason2





Données laser et stations

kiloHz
systems





ILRS : réseau des stations laser



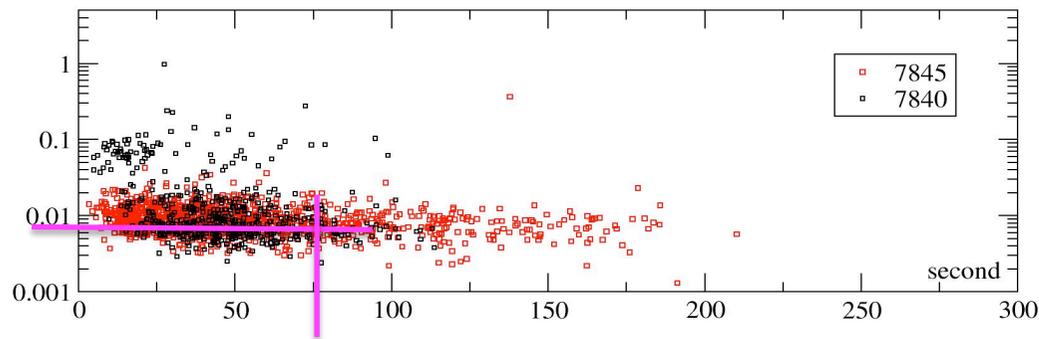
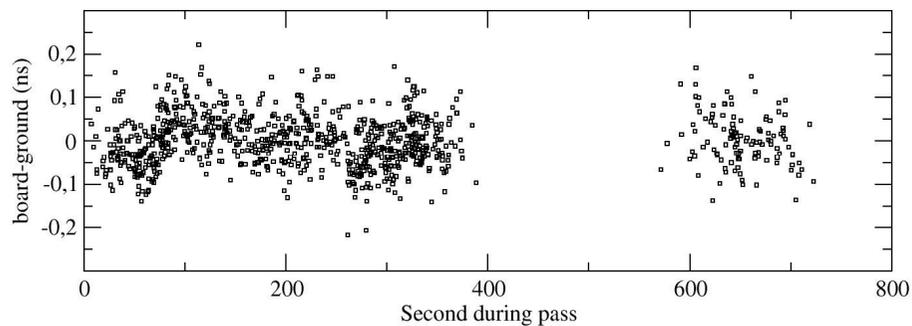
SLR station	time transf. @ 1s	stab. @ 60 s
1824,1873,1893	~ 85 ns	-
7080: Mac Donald	< 1 ns	6-8 ps
7090: Yarragadee	~ 50 ns	2-3 ns
7105: Greenbelt (2014)	< 1 ns	30 ps
7237: Changchung	< 1 ns	4-5 ps
7308: Tokyo	< 1 ns	4-5 ps
7810: Zimmerwald	< 1 ns	6-8 ps
7824,7824	~ 50 ns	2-3 ns
7840: Hx	< 1 ns	6-8 ps
7845: Grasse	< 1 ns	6-8 ps
7941: Matera	< 1 ns	6-8 ps
8834: Wettzell	< 1 ns	6-8 ps
7501,7110,7119,7124,7403	~ 50 ns	2-3 ns
FTLRS : 7822, 7828, 7829	< 1 ns	6-8 ps



Performance du lien sol-espace

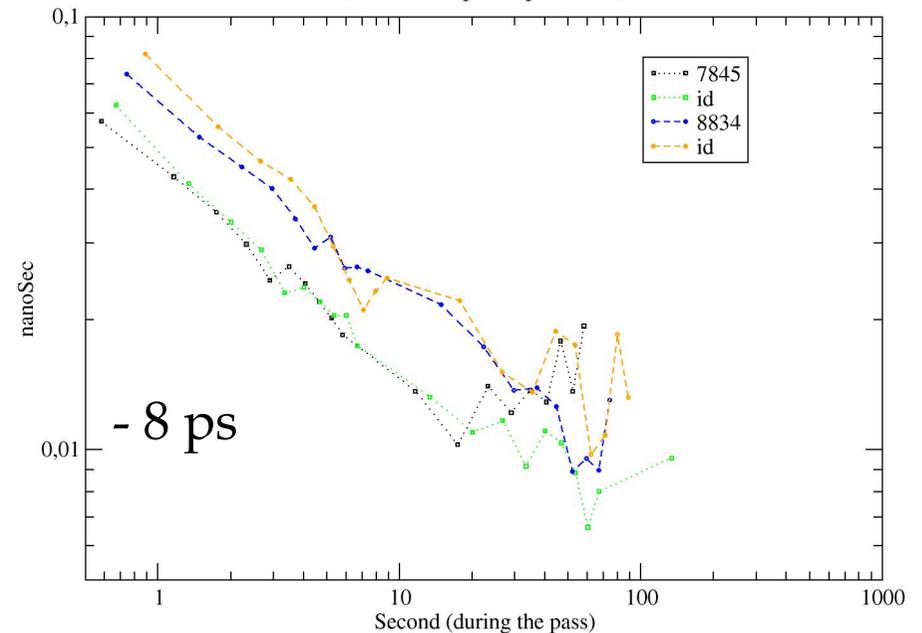
Residuals of time transfer equation after removing of a frequency bias (USO) :

~35 ns / seconde (0.01 ns/sec / day)



75 sec

(from 2 SLR passes per station)

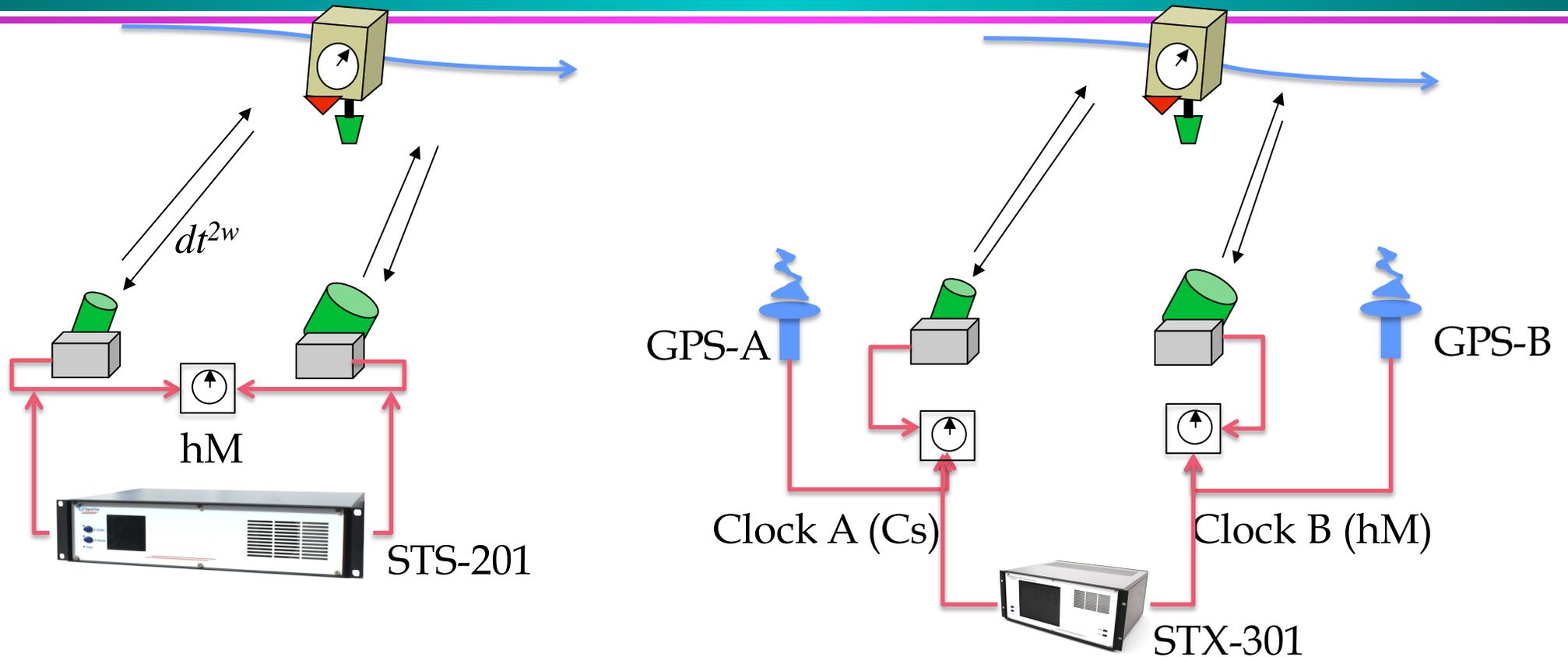


Best performances : 4-8 ps @ 75 sec
deduced from a multi-yr analysis

Exertier, et al., 2010



Expériences de type -1 and -2



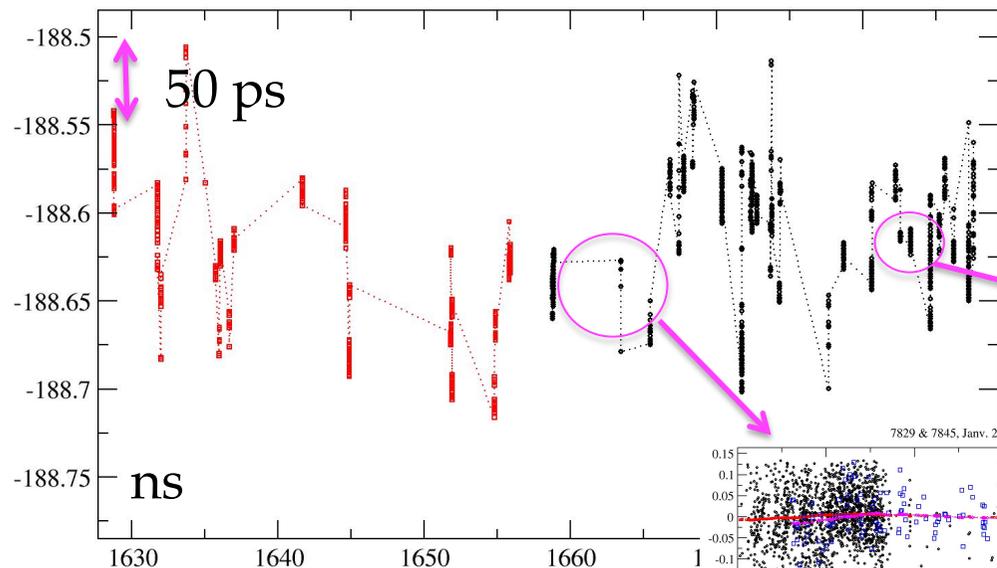
Experiments on the **same site**, Grasse, with 2 SLR stations, 2 GPS antennas, and time & frequency laboratory (metrology, clocks, cables, etc.). Plus equipment (STX) for exactness and STS for stability

Samain et al., 2010



Type -1

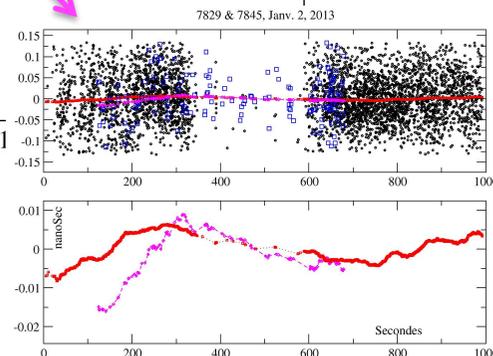
- Exp. -1 : stability (short & long terms)
 - » satellite in common view, same clock on the ground (h-maser), 2 independant SLR systems (FTLRS and MeO)
 - » STS201 for monitoring the stability (cables...)



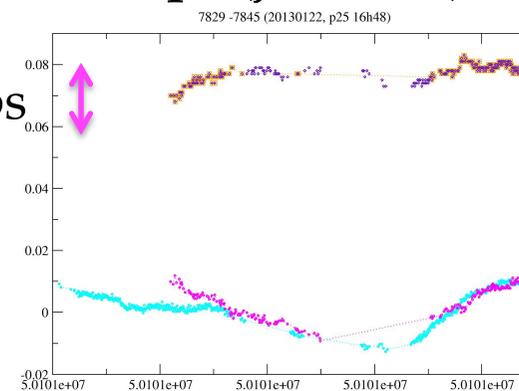
CAL = 188.5 ns :: T2L2 = 188.6 ns

≠ 0.108 ns ± 36 ps (dec. 2012)

≠ 0.048 ns ± 31 ps (jan 2013)



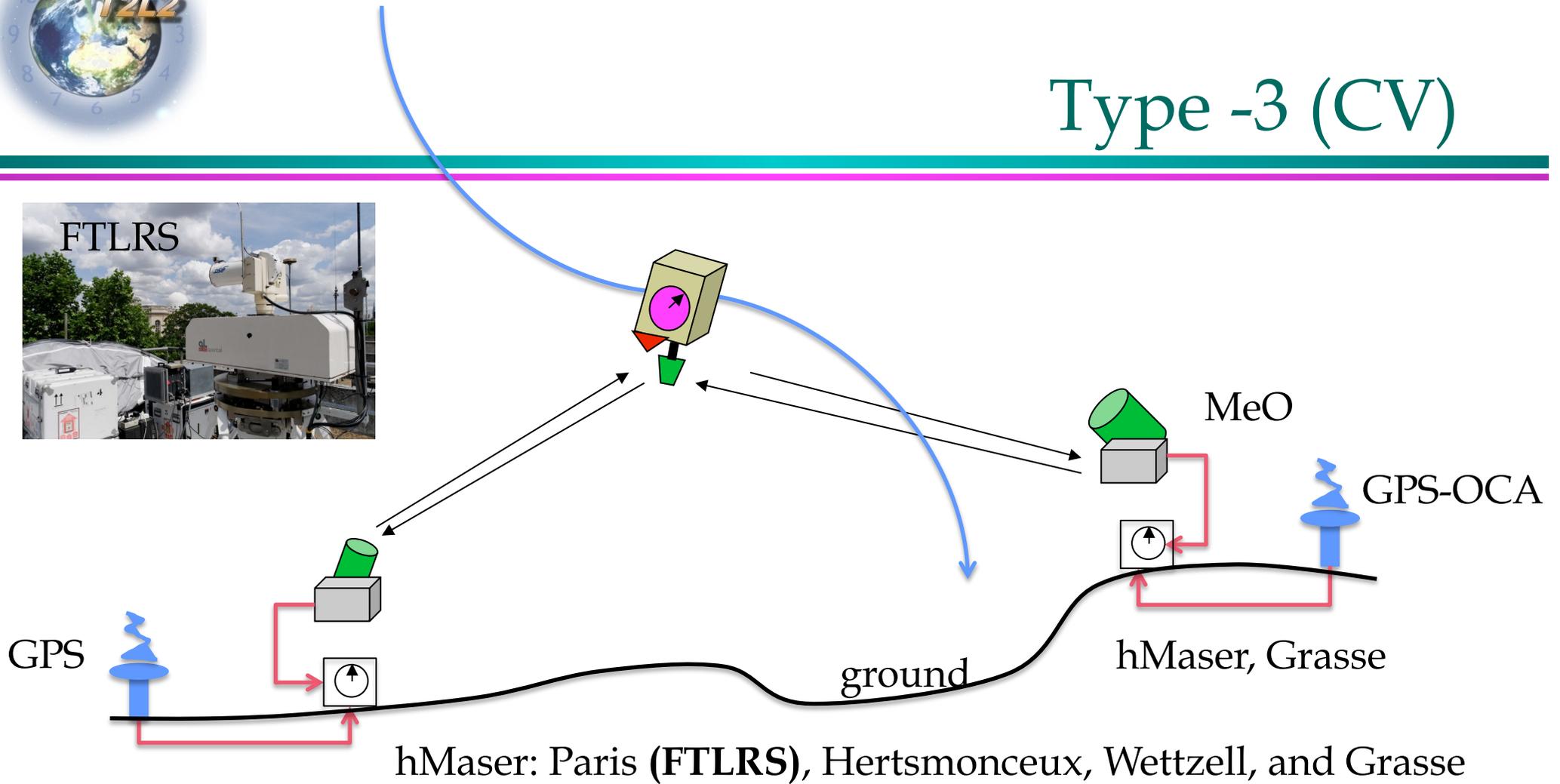
20 ps



Samain et al., 2015



Type -3 (CV)



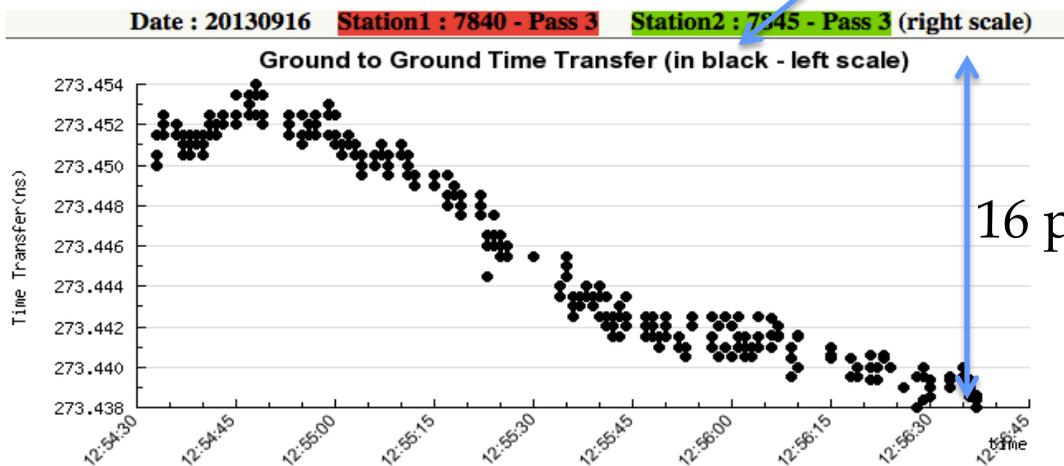
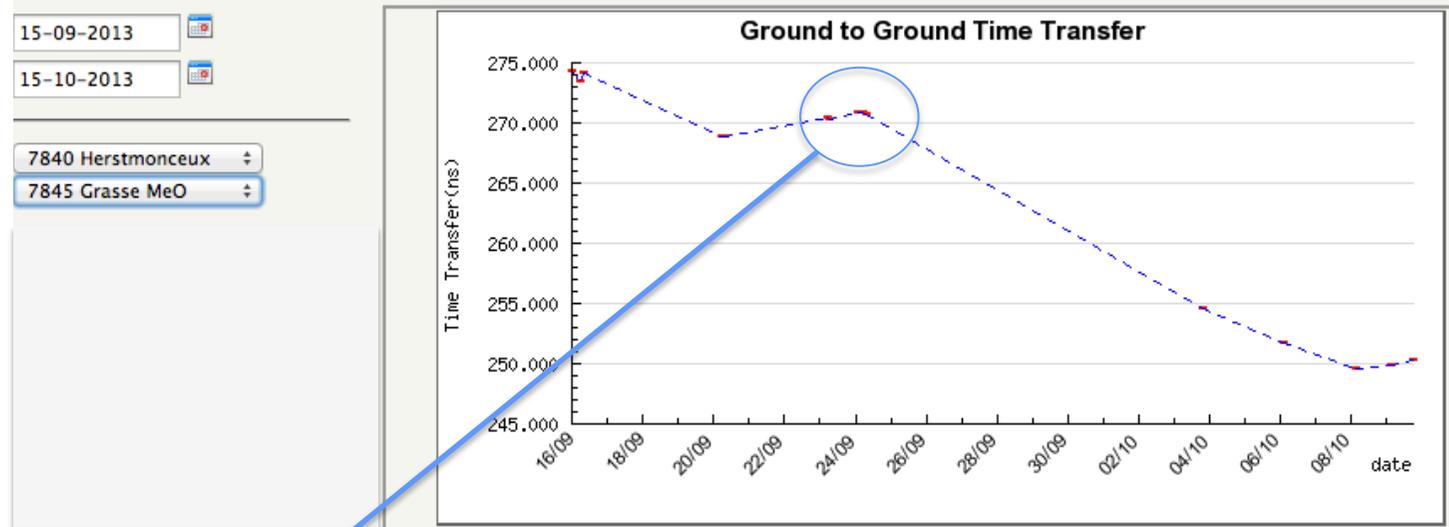
Experiment between Grasse and european observatories (SLR stations), and FLTRS as a mobile equipment; plus GPS, and CALibration campaigns.



Configuration en CV.

Sept.-Oct. 2013 :

A dedicated monitoring between :
Grasse, Paris
Hertsm., Wetz
SLR's + h-masers



Time transfer between h-masers

Example: Grasse and Herst. (UK)

-> CALibration made by:
(R.Sherwood, JM Torre, E Samain, C Courde, 2013)



L'impact des progrès technologiques

- | | | |
|---|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ● Laser <ul style="list-style-type: none"> » Role of mobile systems » Pulse energy and width » Detectors | <p>Laser - TF labo.
stability, acquisition
noise, accuracy, efficiency</p> | <p><i>Degnan, J., 1997</i></p> |
| <ul style="list-style-type: none"> ● Cloks and timers <ul style="list-style-type: none"> » Better clocks (h-maser, cesium, etc.) » Picosec. resolution (1 -> ~50ps) | <p>stability 0.1-1000 s
timing</p> | <p>} SLR
community</p> |
| <ul style="list-style-type: none"> ● Accuracy & Stability <ul style="list-style-type: none"> » Laser link (calibration) » Ground links (& calibration) » Ground timers » » Clock frequency | <p>~ 10 ps
< 100 ps (stability 10ps @1d)</p> | |
| <ul style="list-style-type: none"> ● GNSS calibrated links to reach TAI/UTC | <p>~ 100 ps</p> | <p><i>Samain et al., 2015</i>
<i>Panek, et al., 2013</i>
<i>Prochazka et al., 2011</i>
<i>Samain et al., 2011</i>
<i>Kodet, 2014; Mao, 2014</i>
<i>Rovera et al., 2014</i></p> |
| <ul style="list-style-type: none"> ● Analysis and methodology | <p>~ 2 ps</p> | <p><i>Exertier et al., 2014,2015</i></p> |



Métrologie, critères de succès

Objectifs	Critère de succès	Perf. actuelle	Acquis	
Validation Transfert Sol Espace	$\sigma_x(0.1) = 55 \text{ ps}$ $\sigma_x(1000) = 1 \text{ ps}$	$\sigma_x(1) = 55 \text{ ps}$ $\sigma_x(1000) = 10 \text{ ps}$	✗ ✗	<i>Exertier et al., 2010</i>
Validation Transfert Sol-Sol en vue commune	$\sigma_x(1000) = 1.5 \text{ ps}$ $\sigma_x(1 \text{ j}) = 5 \text{ ps}$	$\sigma_x(1000) = 10 \text{ ps}$ $\sigma_x(1 \text{ j}) = 20 \text{ ps}$	✗ ✗	<i>Samain et al., 2011</i>
Validation T2L2 Transfert Sol-Sol en vue non commune	$\sigma_x(300) = 150 \text{ ps}$ $\sigma_x(3000) = 2 \text{ ns}$	$\sigma_x(300) = 150 \text{ ps}$ -		2014-16
Inter-comparaison des liens RF : Stabilité des liens GPS PPP	$\sigma_x(10000) = 15 \text{ ps}$ $\sigma_x(1 \text{ j}) = 40 \text{ ps}$	$\sigma_x(10000) = 20 \text{ ps}$ $\sigma_x(1 \text{ j}) = 20 \text{ ps}$	✗	<i>Exertier et al., 2013</i>
Inter-comparaison des liens RF : Exactitude des liens (code)	$E = 1 \text{ ns}$	$E = 100 \text{ ps}$	✗	<i>Rovera et al., 2014</i>



Transfert de temps optique, perspectives

- **ELT** /ISS*** fin 2016 viendra après **T2L2** /Jason2, puis GRASP (2020 ?)
- Le réseau laser s'améliore, dans l'objectif GGOS: meilleures définitions des mesures et des systèmes de temps dans les observatoires géodésiques
 - » Précision lien 10 ps (laser kiloHz), Etalonnage station laser < 100 ps**
- Rôle de GNSS comme moyen permanent de TT sol-sol entre Obs. géodésiques et échelles de temps (nationales, puis vers le TAI)
- CNES, OCA, OP, OB ont une grande expérience des missions dédiées à la physique fondamentale: Microscope, T2L2, ACES/PH, tests de RG avec INPOP, etc.)
- Ce qu'il faudra : tests de la relativité (génération post-Microscope), géodésie et unification gravité-géoïde et temps à 1mm :
 - » Rôle des horloges au sol -> 10^{-18} /2-3 j (déjà le cas) // Horloges spatiales *

Petit, G. EFTF 2013 *

Prochazka, I. 2014 **

Dimarcq, N. ibid 2013 *

Schreiber, U., 2011 ***



Suite...

Comparaisons d'horloges et Echelles de Temps

- Horloges sol : en Vue Commune: 10-18 en fréquence après qq jours d'intégration (cf. STE-QUEST)
- Exactitude: transfert de temps sol - espace < 50 ps
- Synchronisation d'Horloges sol: < 50 ps
- Echelles de Temps atomiques : en exactitude de fréquence < 10^{-16}

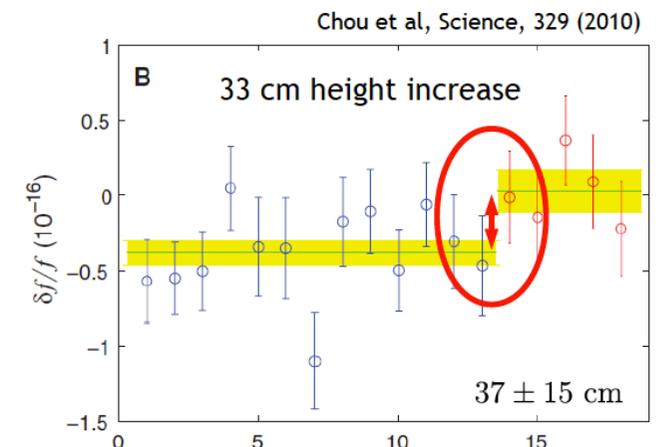
Géodésie

- Différence de géopotential entre 2 points au sol: #U : $0.15 \text{ m}^2.\text{s}^{-2}$ -> équivalent à 1.5 cm sur le géoïde

Systemes de référence

- Unification des références terrestre et céleste pour l'observateur terrestre.

P. Wolf et al., 2014





Suite...

- Géodésie spatiale : problème des orbites/ plateforme PROTEUS (Attitude et altitude)
 - DORIS, système Doppler -> positionnement, orbitographie $\sim 10^{-12}$ ($0.3 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$)
 - 1-way laser



- Physique fondamentale
 - Red shift gravitationnel
 - Limité à qq 10^{-13} DORIS/T2L2
 - Invariance de Lorentz
 - Signal à 5 ps / 1000 sec => progrès / OUS

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{W_B - W_A}{c^2} + O(c^{-4}), \quad W = U + \frac{v^2}{2}$$

$$10^{-18} \leftrightarrow 0.1 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \leftrightarrow 1 \text{ cm}$$



Applications T2L2, critères de succès

Objectifs	Critère de succès	Perf. actuelle
Physique fondamentale, anisotropie vitesse de la lumière	$\sigma_x(1000) = 5$ ps > 3 mois	$\sigma_x(1000) = 15$ ps
Jason 2 : Caractérisation de l'oscillateur	$\sigma_x(10) = 2.5$ ps $\sigma_x(300) = 100$ ps	$\sigma_x(10) = 10$ ps $\sigma_x(300) < 100$ ps
Jason 2 : Télémétrie 1 voie	$\sigma_x(30) = 10$ ps Obs > 80 °	$\sigma_x(30) = 20$ ps 87°
Bilan de liaison	Reboucler mesure et modèle	Non évaluée



Physique fondamentale

- Anisotropie de la vitesse de la lumière

Etat de l'art (GPS) : $\frac{\delta c}{c} = 2.9 \cdot 10^{-9}$

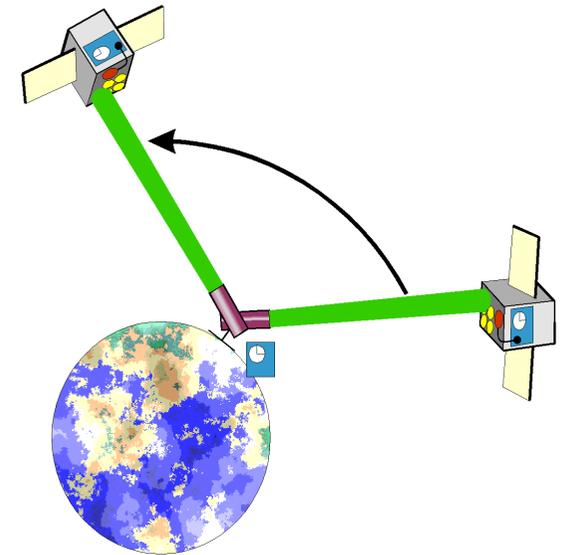
T2L2 Doris : $\frac{\delta c}{c} = 10^{-10}$

→ $\sigma_x(1000) = 5 \text{ ps}$

- Dérive de la constante de structure fine

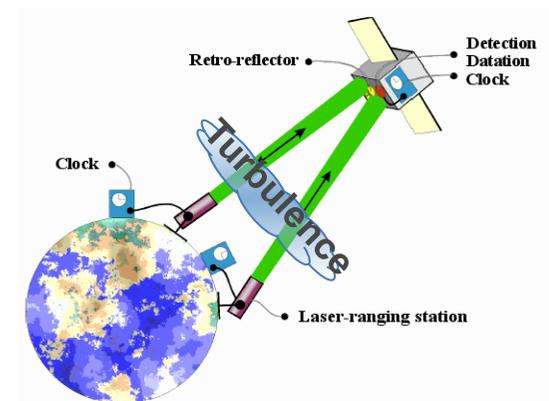
Comparer des fréquences à qqs 10^{-17} sur 10 jours en vue commune

→ $\sigma_x(100j) = 50 \text{ ps}$



La turbulence optique dans l'atmosphère est un facteur limitant pour les liens lasers vers l'espace :

- Fluctuation de phase
- Scintillation
- Perte du signal



→ Bilan de liaison difficile :

1 photon reçu sur 10^{19} émis sur la lune

- Problème pour les liens cohérents
- Données de la turbulence quasi inexistantes sur Calern
- Turbulence « moyenne » = Erreur de 1mm ou 3ps



Applications à d'autres missions

- Transfert de temps dit 2-way (mesure des triplets : dates départ et retour (échelle de temps en station), et date bord (échelle de temps bord))
- Prendre en compte différents aspects:
 - » orbite, instruments (sol et bord), réseau au sol (permanent, voire avec stations mobiles)
 - » Réalisme: bruits, statistiques (important en TT sol-sol VnonC, disponibilités (visibilités, pannes, météo), coûts
 - » A bord: pas de vibrations, variations températures, etc. (mais possibles)
 - » Technologies (liens lasers, oscillateurs au sol et spatial et dateurs)
 - Laser: cadence, énergie // détecteurs
 - Oscillateurs (bruits, stabilités court et moyen termes)
 - » Relativité (potentiel U, stations au sol)