

TRANSFERT DE TEMPS PAR LIEN LASER - T2L2 : COMPARAISON SUB-NS AVEC GPS-CV

La lune blanche
Luit dans les bois ;
De chaque branche
Part une voix
Sous la ramée ...

Ô bien-aimée.

L'étang reflète,
Profond miroir,
La silhouette
Du saule noir
Où le vent pleure ...

Rêvons, c'est l'heure.

Un vaste et tendre
Apaisement
Semble descendre
Du firmament
Que l'astre irise ...

C'est l'heure exquise.

L'heure exquise - P. VERLAINE



PLAN DE LA PRÉSENTATION

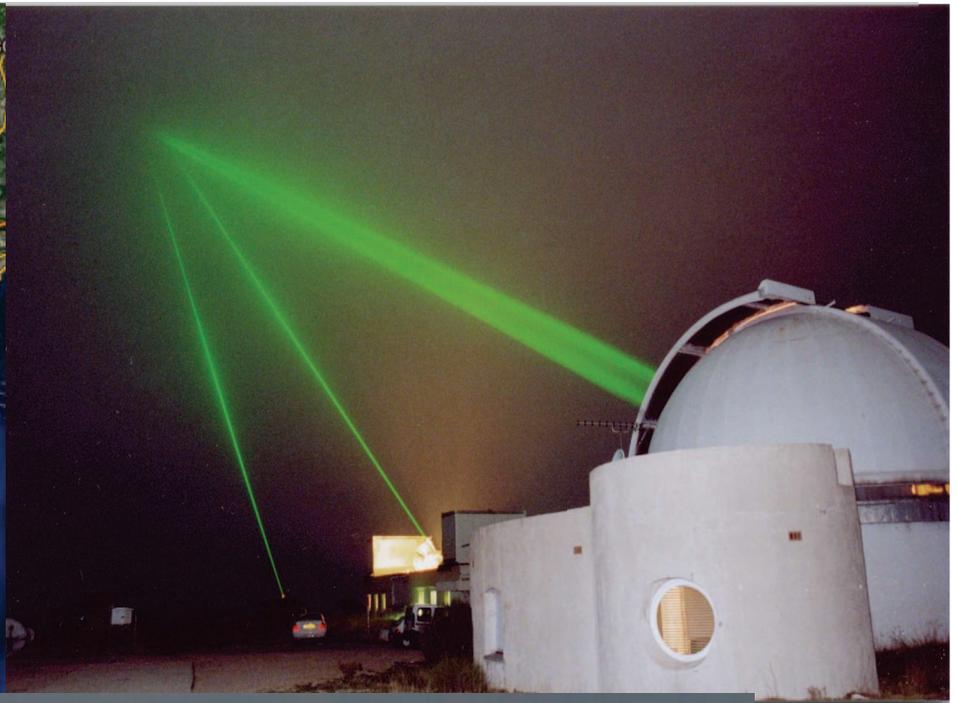
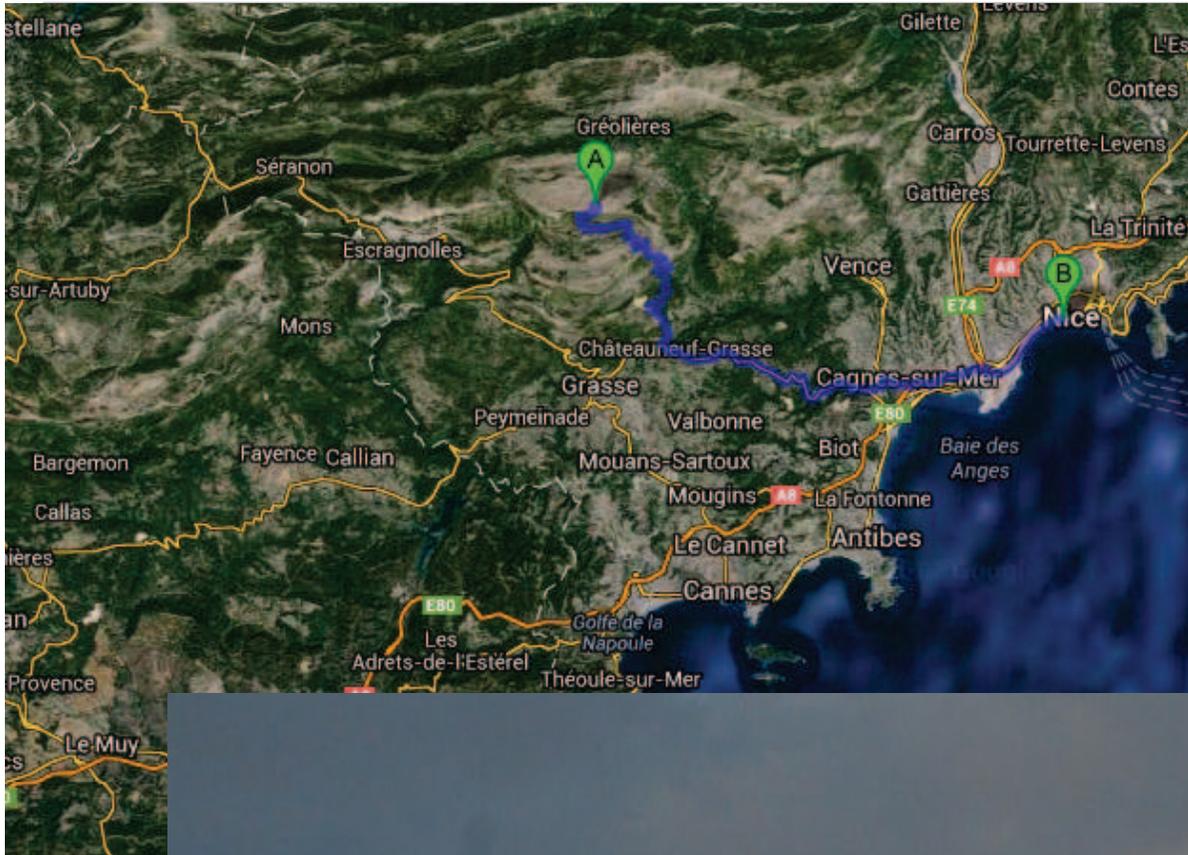


I. T2L2 : un moyen unique de transfert de temps sur le plateau de calern (OCA)

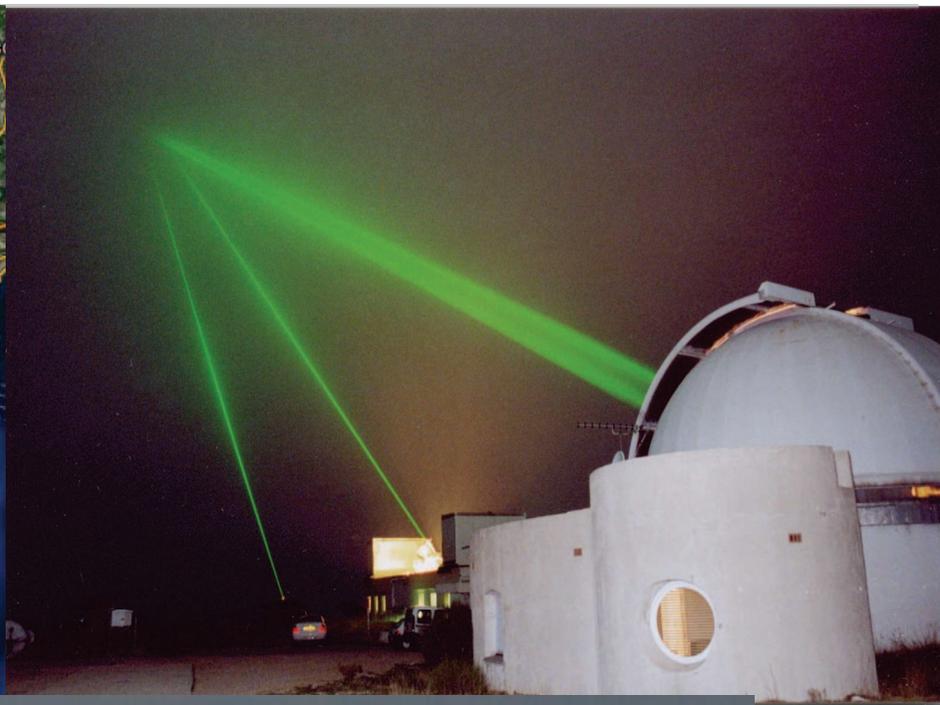
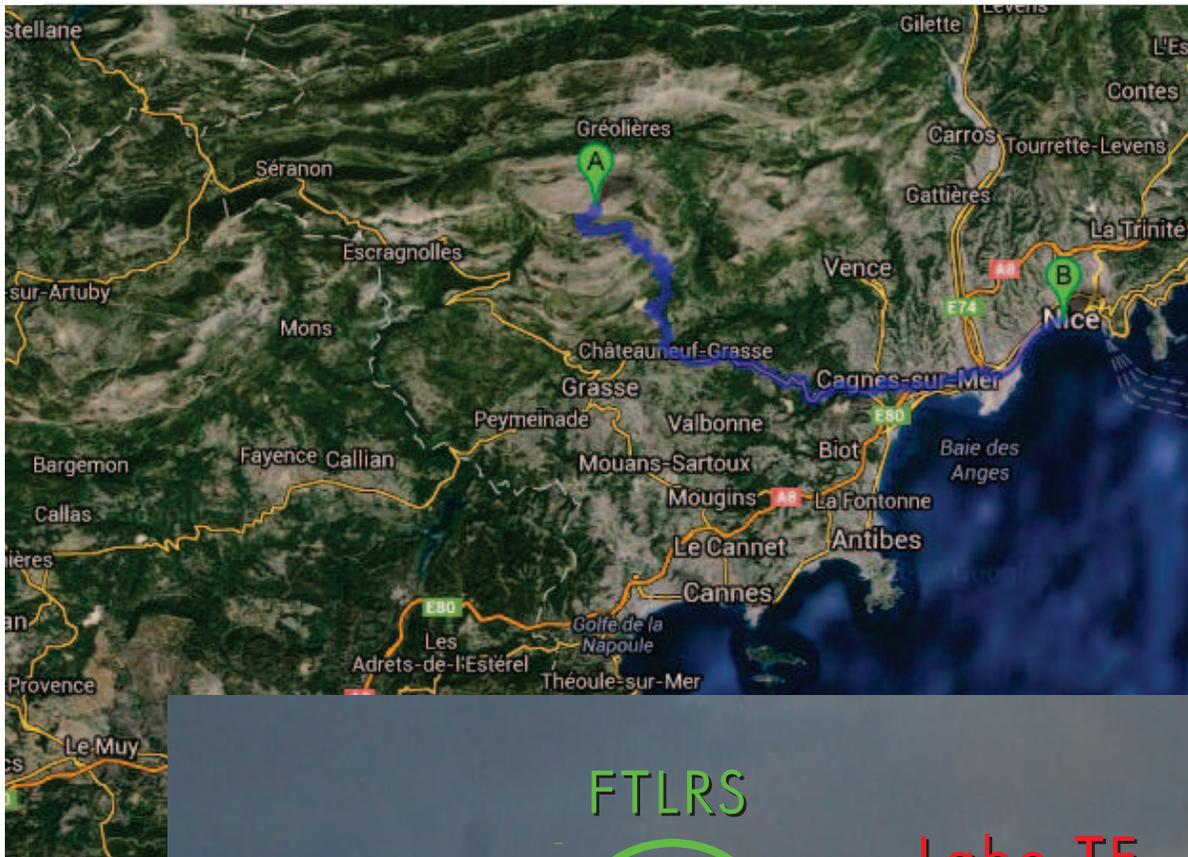
II. Développements de l'année 2013 – performances au sol

III. Campagne européenne de transfert de temps

A L'HEURE DU PLATEAU DE CALERN



A L'HEURE DU PLATEAU DE CALERN



A L'HEURE DU PLATEAU DE CALERN

T2L2
MéO & FTLRS

Comparaison des techniques
de transfert de temps

R&D
Métrologie de précision

Télémétrie laser :
MéO & FTLRS



Participation au
TA(F)

Participation au
TAI

Participation à
UTC

Equipex :
REFIMEVE+

Labex :
First-TF

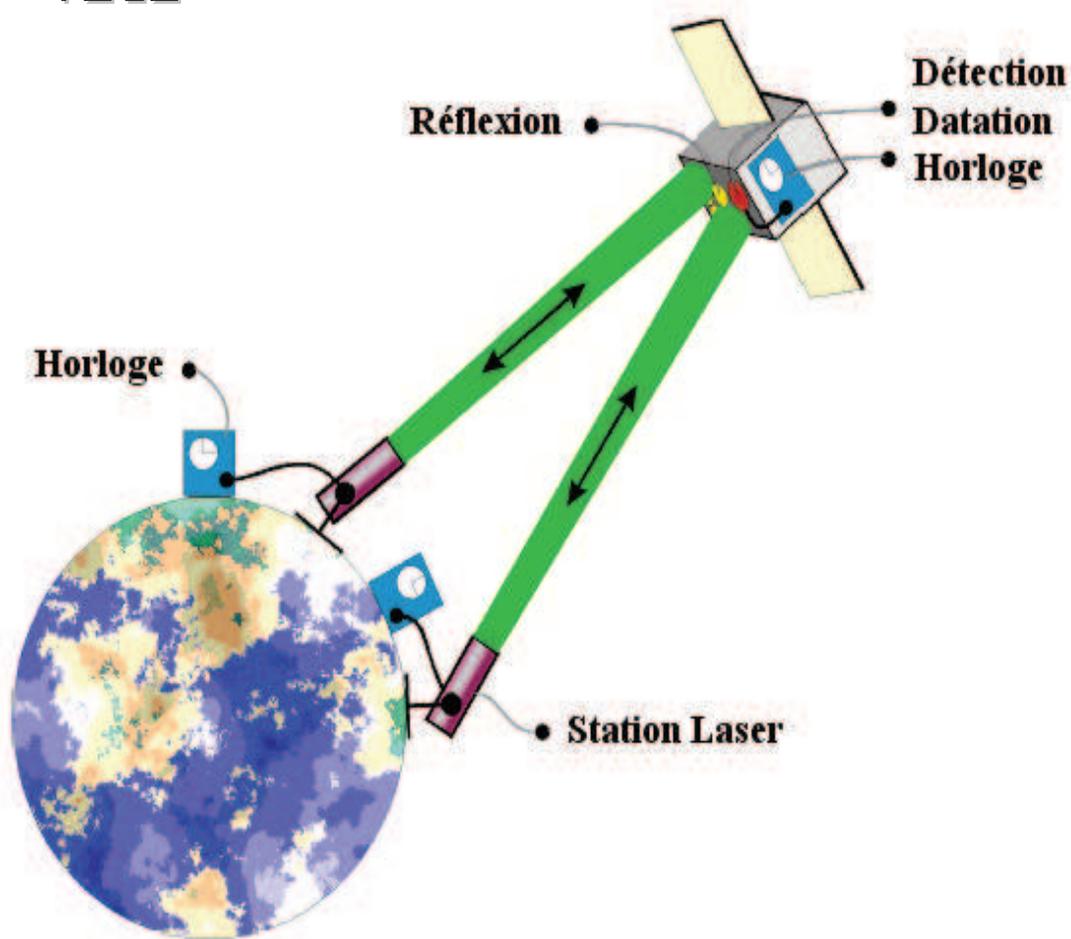


A L'HEURE DU PLATEAU DE CALERN

- 1 stations laser fixe MéO 1.54m (Télémétrie, T2L2, lien cohérent)
- 1 station laser ultra-mobile FTLRS (Télémétrie, T2L2)
- 1 système de transfert de temps 2 voies TWSTFT
- 2 horloges atomique Césium
- 2 masers à hydrogène
- 3 dateurs ultra stables STX (précision : 0.6 ps rms et linéarité : 0.3 ps rms)
- 2 récepteurs GPS Dicom GTR 50
- 1 micro-phase stepper, 5 intervalomètre SR620, amplis, multiplexeurs ...



T2L2



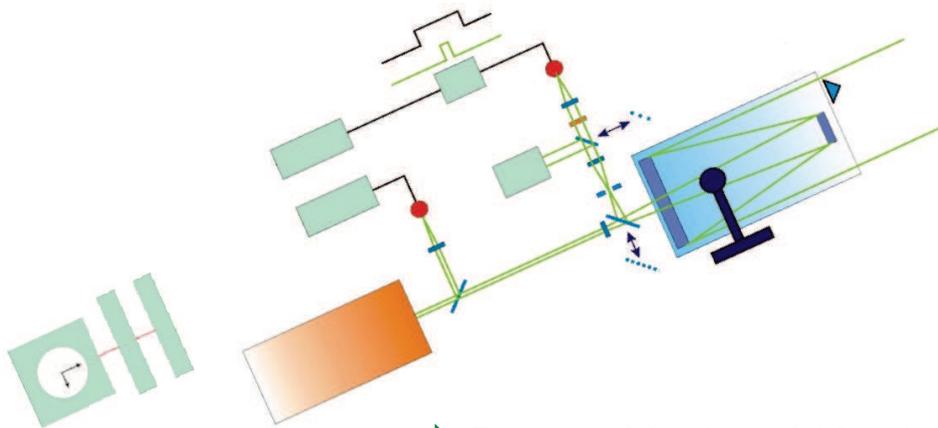
- x Synchronisation d'horloges par lien Laser : impulsions laser envoyées à partir de plusieurs stations laser au sol vers un satellite équipé d'une horloge et d'une instrumentation de datation des impulsions lumineuses.
- x T2L2 a été lancé en tant qu'instrument passager sur le satellite Jason 2 en juin 2008. Depuis cette date Géoazur et le CNES exploitent les données.



A L'HEURE DU PLATEAU DE CALERN

- ◆ T2L2 est une technique **2 voies** basée sur la datation d'impulsions **optiques** émises (et reçues) par une station laser et reçues par le segment espace.
- ◆ Sol : T_{start} T_{return} Espace : T_{board}
- ◆ A partir des **3 dates** → différences entre les horloges au sol et dans l'espace

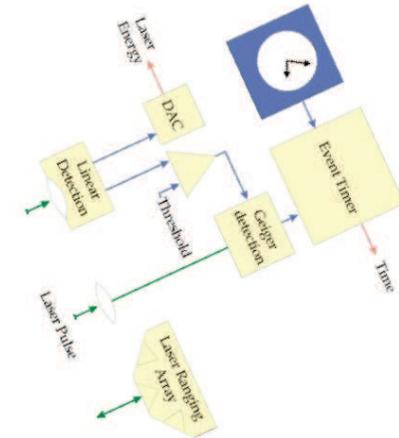
Station Laser



⇒ Energy $400 \mu\text{J}$ -> 200 mJ

⇒ PulseWidth 20 -> 200 ps

T2L2 sur Jason2



⇒ Masse: 10.4 kg

⇒ Power Consumption: 50 W

⇒ Volume : 20 l

- ◆ La comparaison entre des **TT sol-espace** des stations laser du réseau international permet de réaliser des **TT sol-sol**.



A L'HEURE DU PLATEAU DE CALERN

■ Lancé en 2008 sur Jason-2 :

- ◆ Env. 6 ans de mission en continue
- ◆ Plus de 20 stations lasers impliquées dans le monde, soit 26000 passes et env. 130 millions tirs laser détectés
- ◆ Tous les paramètres sont nominaux

■ Traitement de données

- ◆ CMS complètement opérationnel
- ◆ Données <https://t2l2.oca.eu/>

■ Objectifs scientifiques :

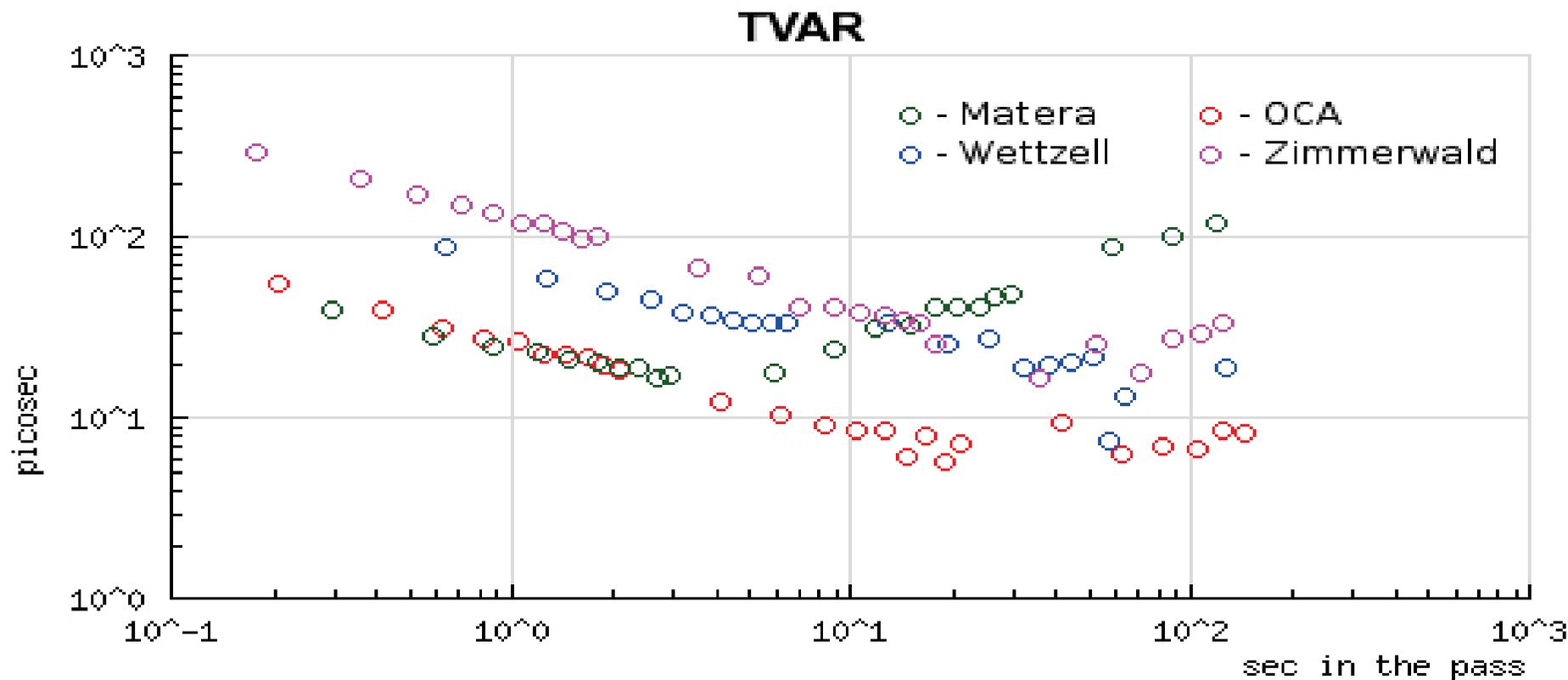
- ◆ Stabilité : $< 10 \text{ ps @ } 100 \text{ s}$, $< 2 \text{ ps @ } 1000 \text{ s}$ & $< 10 \text{ ps @ } 1 \text{ jour}$
- ◆ Exactitude 300 ps
- ◆ Freq. horloge bord : qqes 10^{-13}



Samain, E. et al. International J. Modern Phys. 2008

Résultats en **stabilité**

- La stabilité à court terme : Inférieure à 10 ps de 10 à 100s
- Stabilité du lien sol – bord C horloges sol et bord
- Clairement influencée par les performances SLR / Horloge

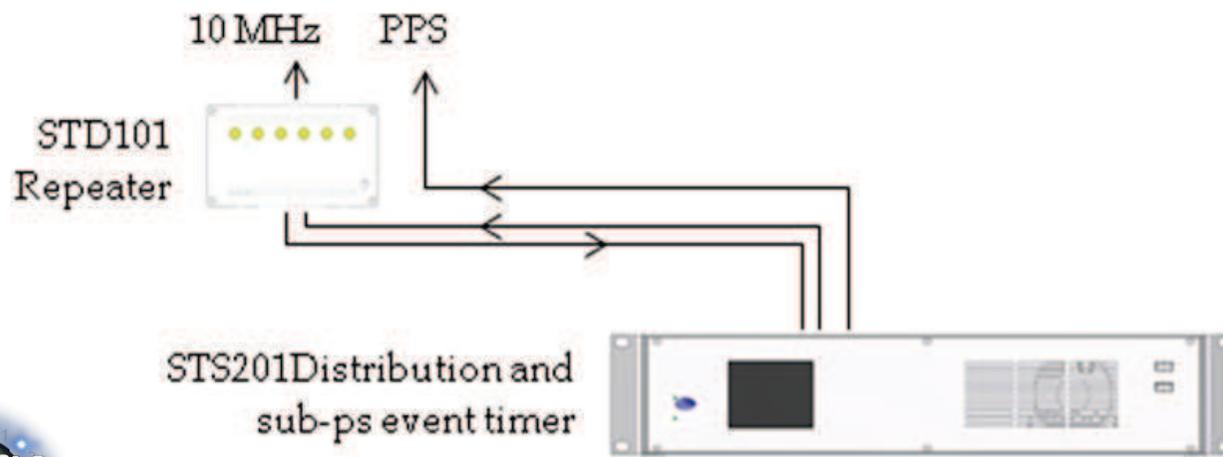


Résultats en **stabilité**

Un transfert de temps “ps” nécessite une **distribution du temps ultra stable** entre l'horloge de référence et les stations laser. Si l'on considère:

- une distance typique entre les stations et référence d'horloge de 100 m,
 - une sensibilité thermique du câble utilisé pour propager la réf. de temps de $100 \text{ fs} / \text{m} \text{ } ^\circ \text{C}$
 - variation thermique à long terme dans la plage de $20 \text{ } ^\circ$,
- la **variation de retard** total peut atteindre **200 ps** qui est loin de l'objectif **ps** de T2L2.

Nous avons conçu un **générateur de signaux de temps ultra stable** comprenant:



un **générateur** de signaux programmable et un **dateur** capable de suivre des variations de délai absolu.



Résultats en **stabilité**

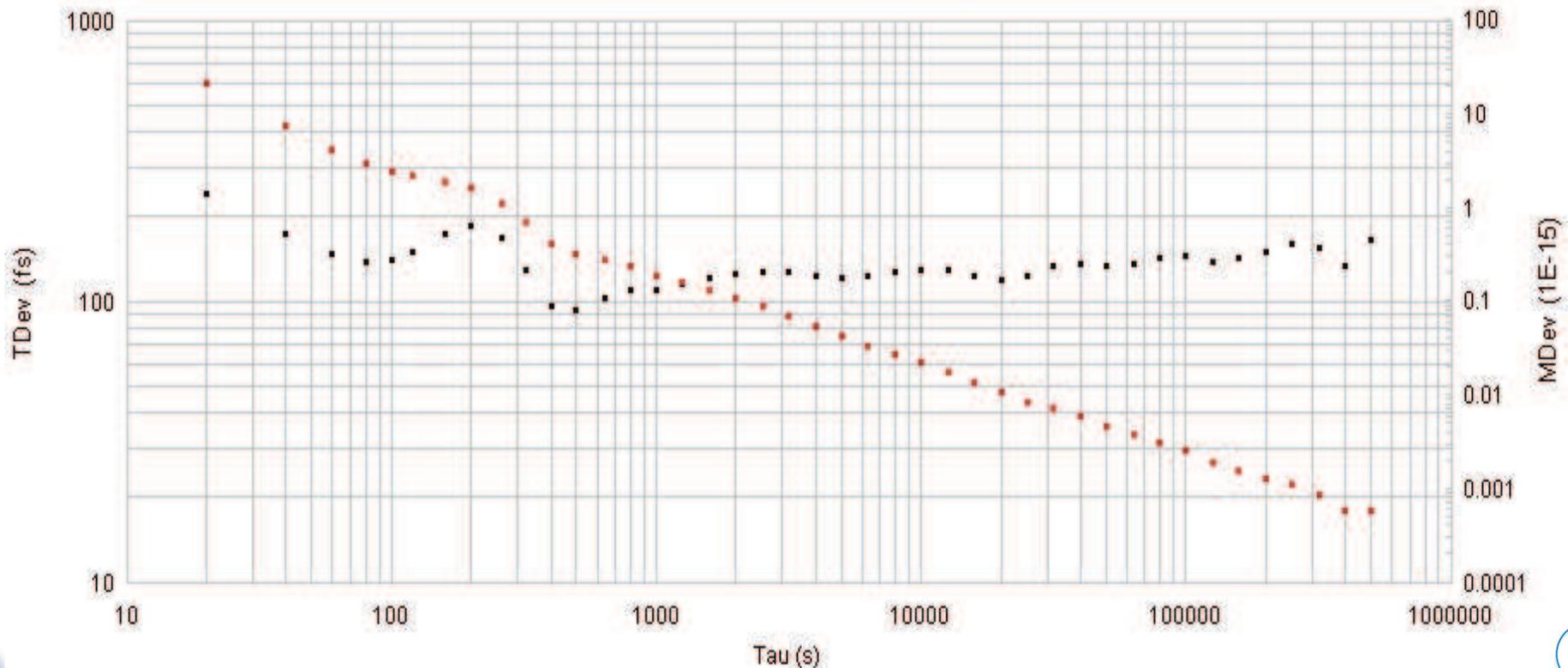
Erreur de répétabilité :

PPS distribution < 1 ps rms

Mesure de délai de temps < 800 fs rms

Stabilité en Temps (Allan Modified): Mdev (rouge) $< 10^{-18}$ @ 5 jours

Dérive totale après 10 jours < 1 ps

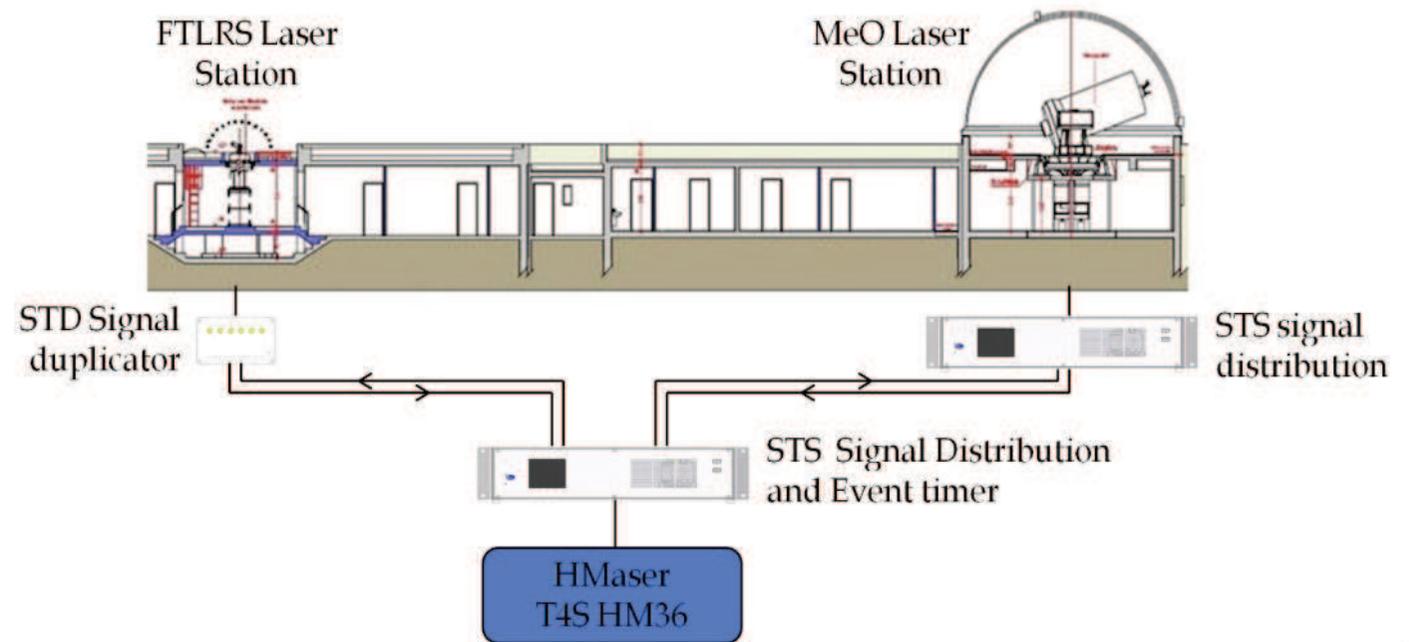


T2L2 : RESULTATS ET PERFORMANCES

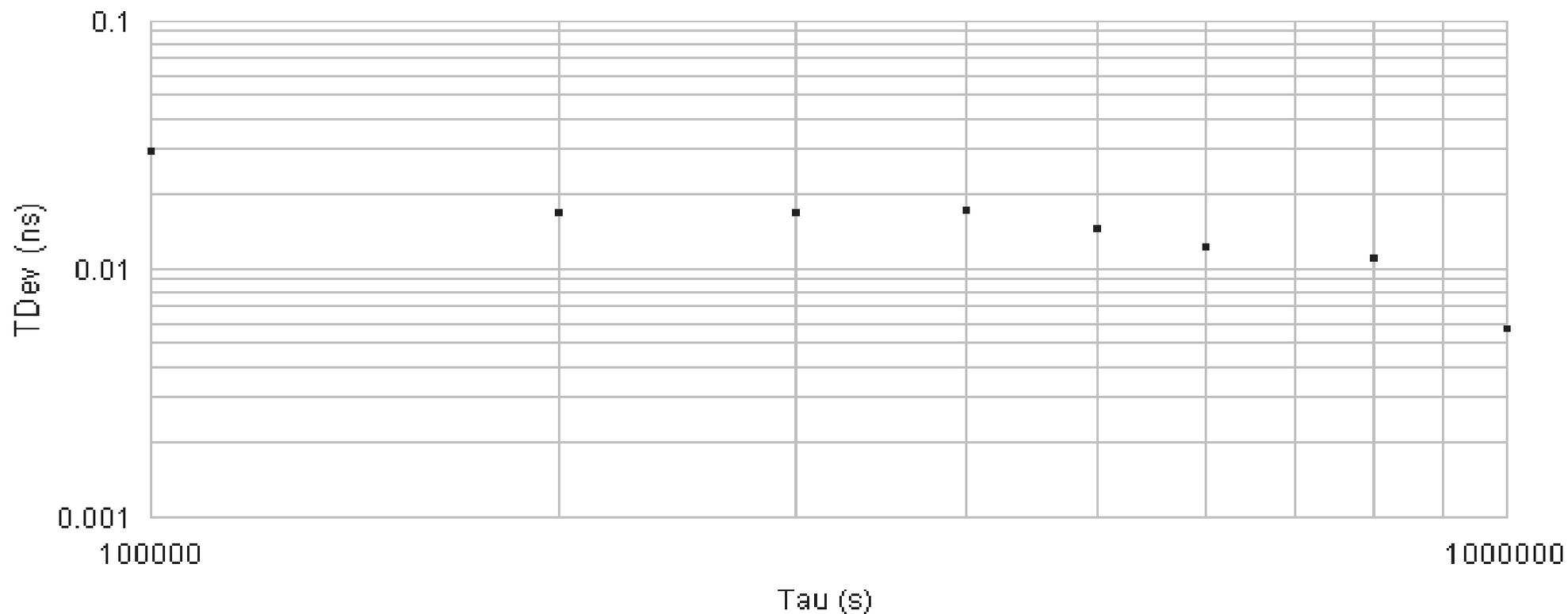
Résultats en **stabilité** : Campagne OCA Haute stabilité 2013

→ Mesure de la performance ultime T2L2

- ✓ Mise en œuvre de l'expérience de colocation :
 - ✓ Horloge commune H-Maser
 - ✓ Distribution STS212 et STD101



Résultats en **stabilité**



Stabilité à long terme

- Entre Méo et FTLRS, horloge commune
- Environ 10 ps de 1 à 10 day



Exactitude

TT sol-sol T2L2 dépend de plusieurs facteurs:

- ◆ **Étalonnage interne de la station laser:** la détermination du retard absolu entre la station laser et le coin cube par rapport à la croisée des axes du télescope.
- ◆ **Étalonnage de la station laser T2L2:** détermination du temps absolu de l'impulsions laser par rapport à la référence PPS.
- ◆ **Datation de l'impulsion laser dans la référence de temps du satellite:** détermination du décalage de temps introduit par la différence de largeur d'impulsion entre stations laser.
- ◆ **Géométrie optique:** détermination du décalage de temps introduit par la géométrie du coin cube Jason 2 et du module de photodétection de T2L2.



Exactitude

- Toutes les déterminations de retard de temps dépendent de la largeur d'impulsion du laser
- La station de calibration T2L2
 - sub picosecond event timer STX301,
 - photodecteur haut debit 25 GHz,
 - fibre optique monomode reliée à un module optique
- La largeur d'impulsion est mesurée par une photodétection haute vitesse
 - Capacité de largeur d'impulsion : 20 ps FWHM
 - La stabilité de l'énergie est nécessaire



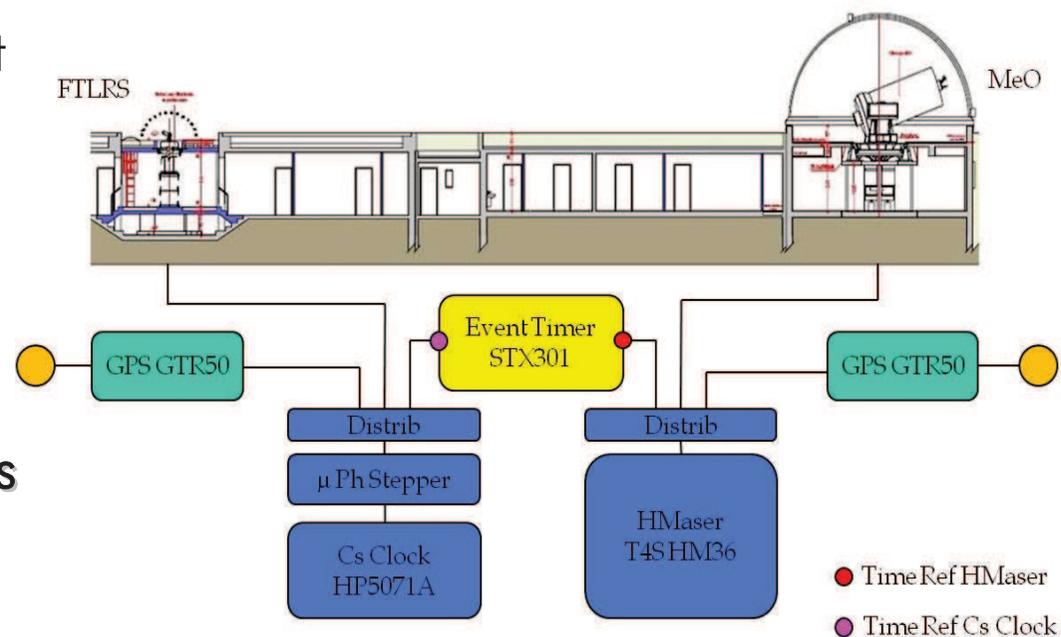
T2L2 : RESULTATS ET PERFORMANCES

Résultats en **exactitude**: Campagne OCA Comparaison monde 2012

→ Comparaison 3x : Direct – GPS – T2L2

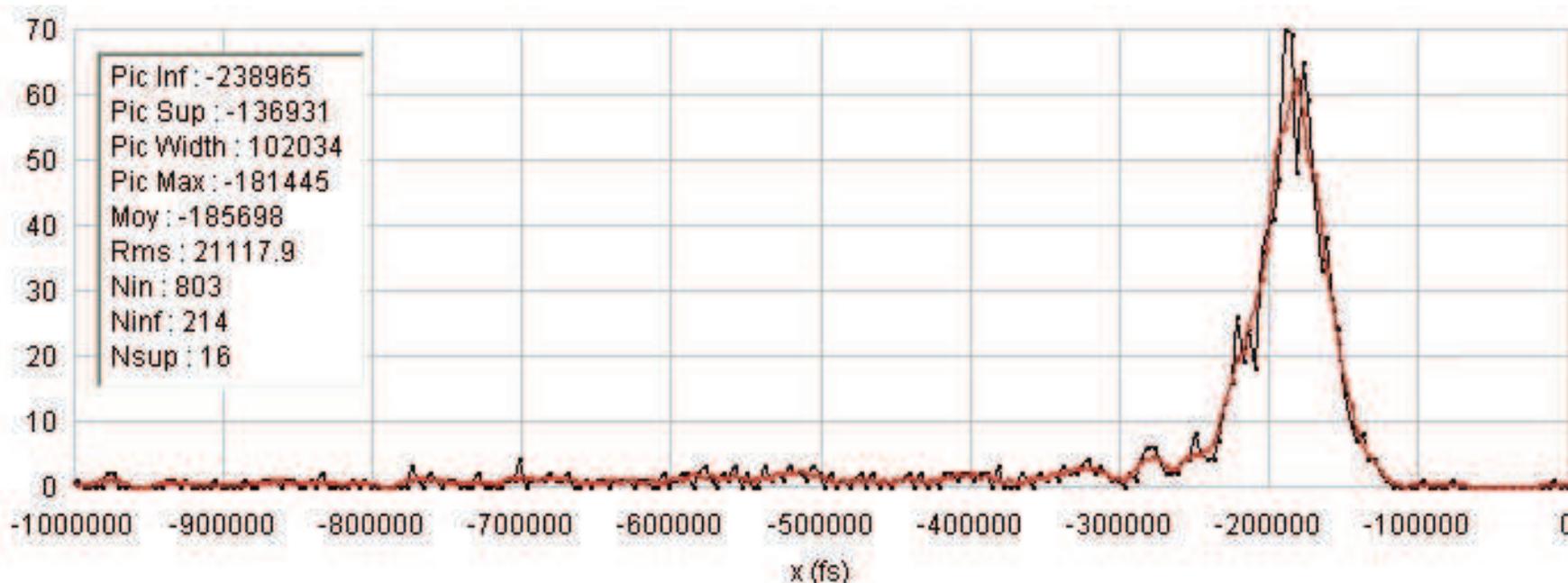
- ✓ Mise en œuvre de l'expérience de colocation (début 2012):
 - ✓ Horloges indépendantes (H-Maser et Césium)
 - ✓ Récepteurs GPS indépendants
- ✓ Campagne d'observation (avril 2012)

- ✓ Différence T2L2 – Direct < 400 ps



Exactitude

- Nouvelle photodetection simple photon : STH 114 Module
 - 200 μm CSPAD (Czech Republic)
 - Intégré sur une carte électronique pour stabilisation thermique
 - Génération d'un signal Geiger
 - Modul mécanique pour lier la photodiode avec FO mono mode
 - Erreur de répétabilité < 25 ps rms



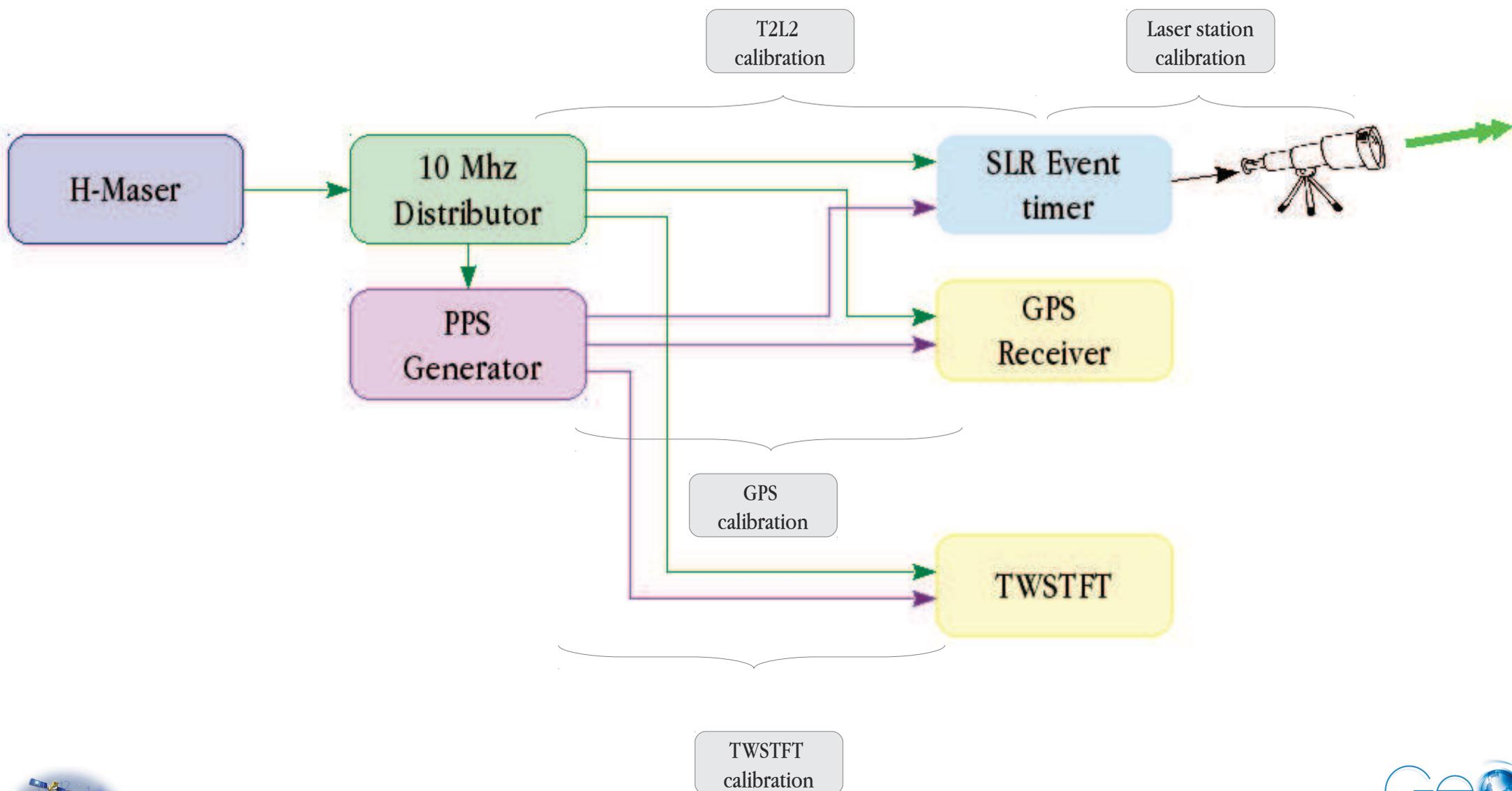
COMPARAISON T2L2 – GPS – derniers résultats obtenus

Campagne T2L2 – multi-techniques sur 4 sites pendant 2 mois en 2013

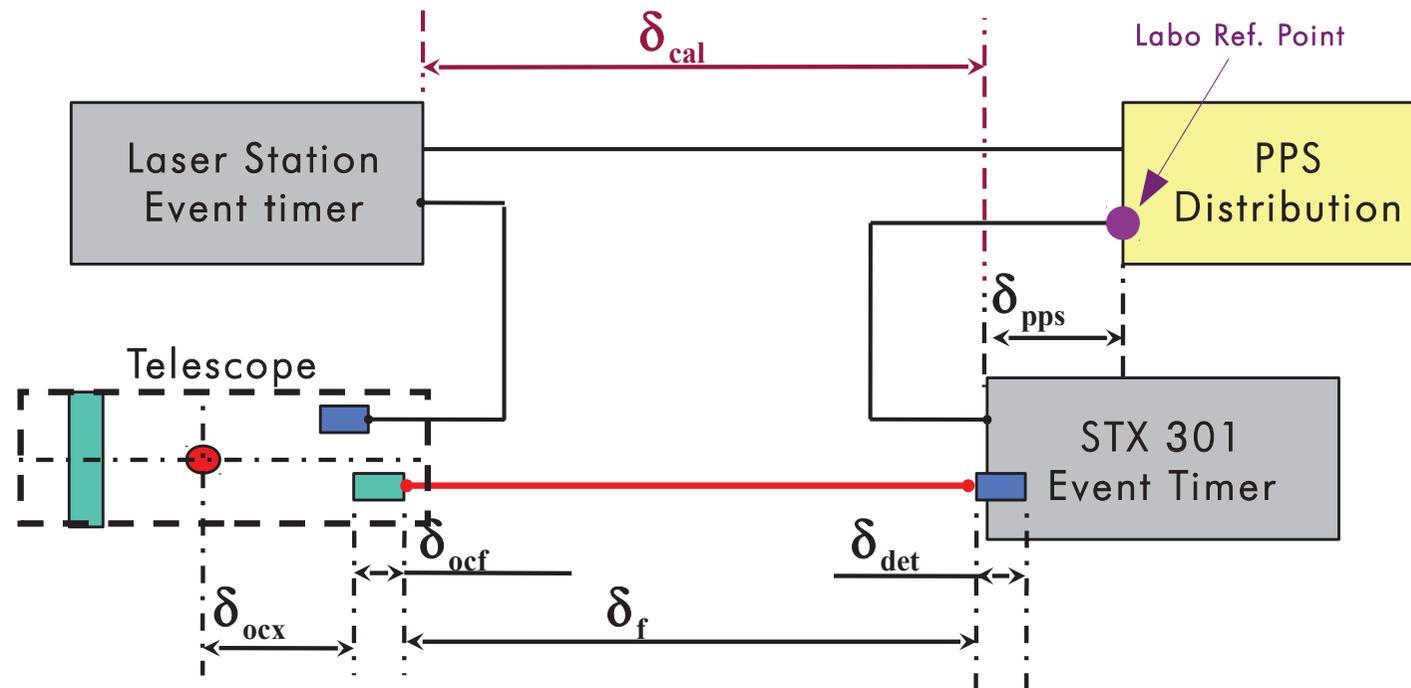


COMPARAISON T2L2 – GPS – derniers résultats obtenus

Principe de l'étalonnage des techniques sur chaque site



Étalonnage de T2L2



* Station de calibration dédiée T2L2 → exactitude d'étalonnage < 50 ps

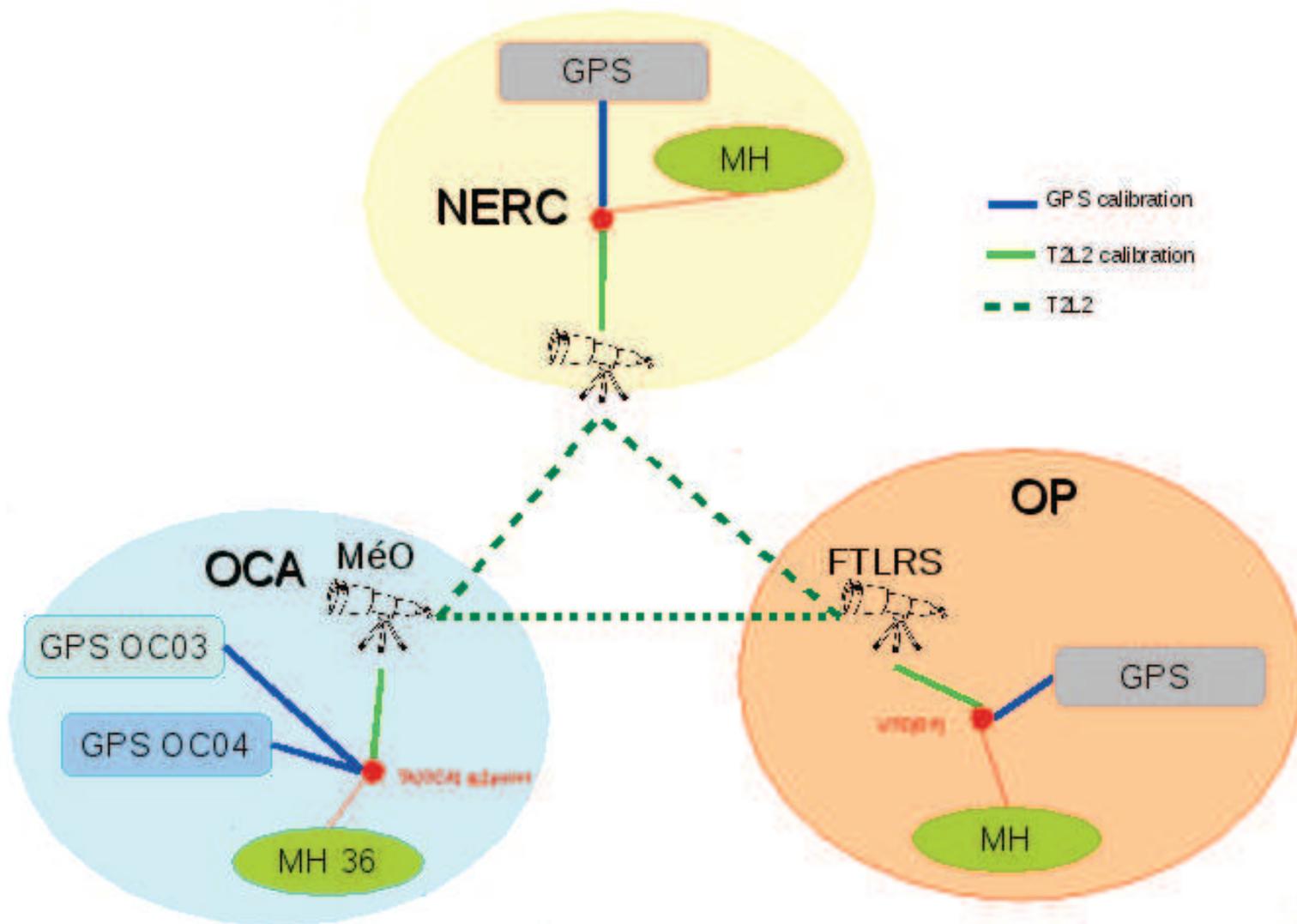
* Mesure du délai entre l'impulsion optique au niveau de la croisée des axes du télescope et la référence électrique provenant du laboratoire du temps et de fréquence.

Équation du temps :

$$\delta T = \delta_{cal} + \delta_{prg} = \delta_{cal} + \delta_{PPS} - (\delta_{ocx} + \delta_{ocf} + \delta_f + \delta_{det})$$



Étalonnage des récepteurs GPS



2 campagnes d'étalonnages GPS en 2013

1 - campagne initiale en mars 2013
→ étalonnage des récepteurs CO03 et OC04 en relatif OPM4

2 - seconde campagne en septembre-octobre 2013
→ étalonnage de liens OP-OCA, OP-HERS, OCA-HERS avec OPM4 et OPM7

Rovera, D. et al. Submitted

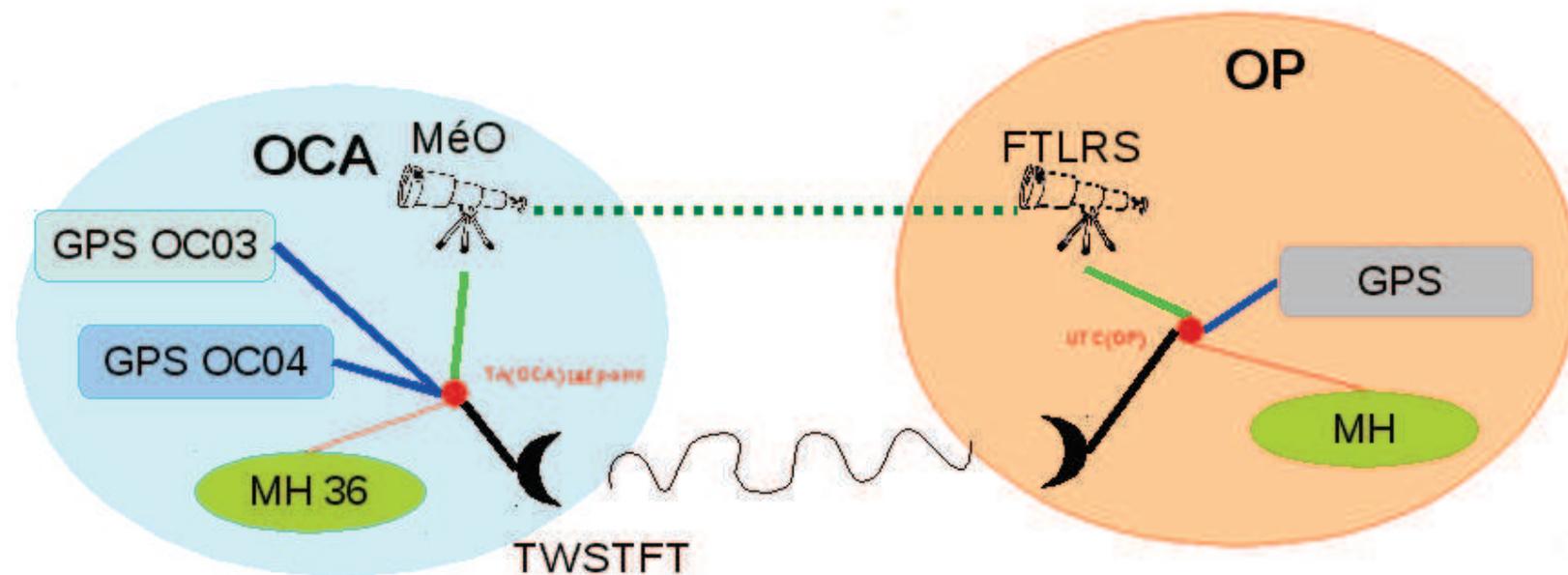
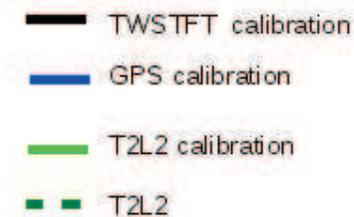


Étalonnage du TWSTFT

2 campagnes d'étalonnages du TWSTFT par GPS en 2013

1 - campagne initiale en mars 2013

2 - seconde campagne en septembre-octobre 2013
→ étalonnage de liens OP-OCA par GPS



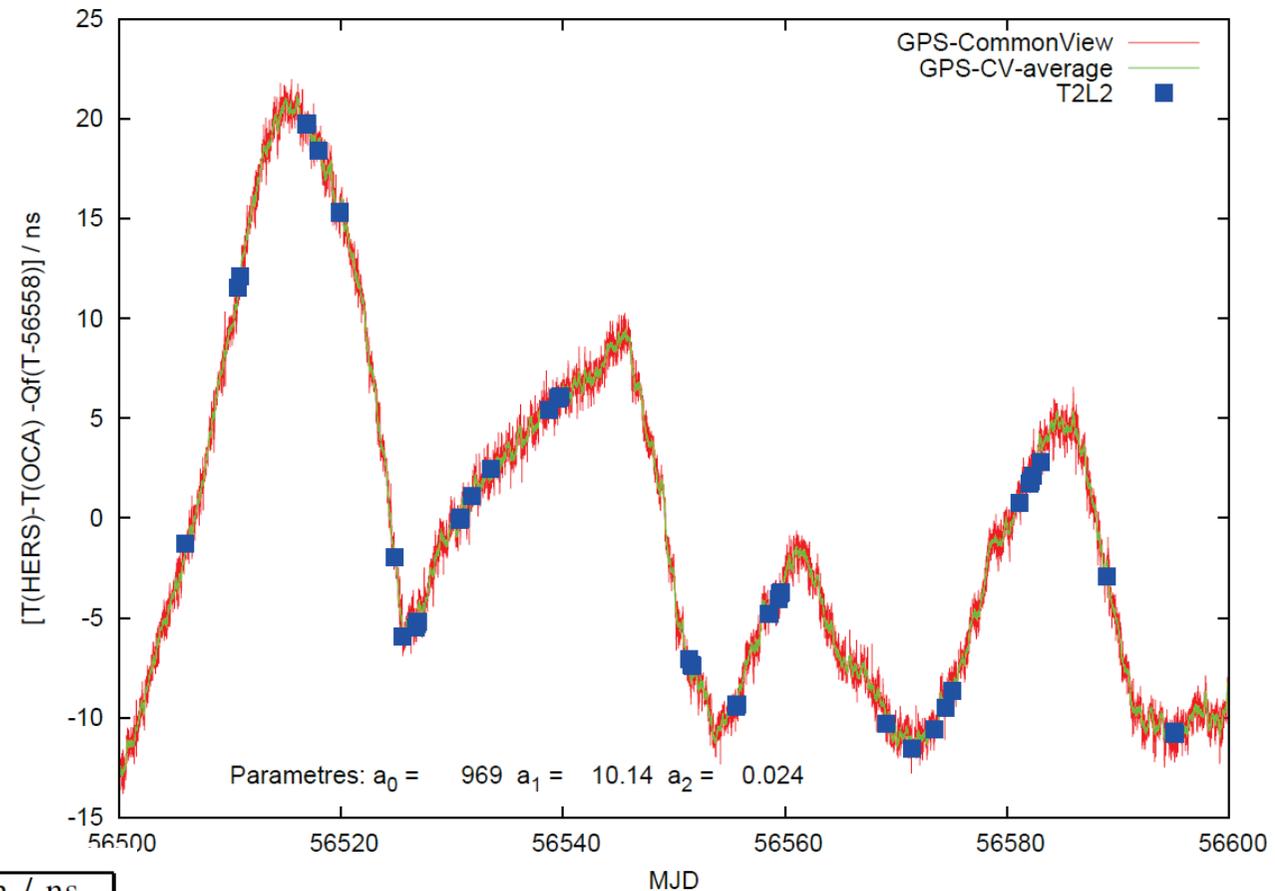
COMPARAISON T2L2 – GPS – derniers résultats obtenus

Résultats en exactitude

Comparison T2L2 / GPS

→ tous les labos ont été **calibrés** pour les 2 techniques

→ diff moyenne entre GPS et T2L2 < 300 ps (avec un écart type de 500 ps du au GPS)



Link	Number of points	Average ns	Standard Deviation / ns	
			GPS CV	GPS filtered
SGF-OCA	42	0.09	0.49	0.37
OP-OCA	12	0.24	0.48	0.25
SGF-OP	5	0.10	0.32	0.32

Rovera, D. et al. Proc. CPEM 2014



Bilan de liaison: mesure du flux laser en prenant en compte la turbulence atmosphé.

- x Pré-analyse de la turbulence sur étoile
- x Prise en compte de la divergence laser dans le bilan
- x Observation T2L2 en comptage de photon
- x Bilan de liaison
- x Proposition CNES d'analyse fine de la turbulence atmosphérique

Anisotropie c : 2 approches

- x Autonome Statistique : basé sur la stabilité long terme de l'oscillateur DORIS
- x Suivi au sol par plusieurs HMaser

Autonome

- x Stabilité Tdev mesurée (T2L2) de l'oscillateur DORIS : $s_x(300) = 100$ ps
- x Stabilité long terme des segments sur 1000 s (DORIS) ?
- x Travaux menés conjointement OCA – OP

Suivi Maser

- x Limité par la stabilité T2L2 sur 1000 s $s_x(1000) = 10$ ps
- x Données Wettzell – Hertsmonceux OCA 2013 – 2014
- x Travaux à réaliser

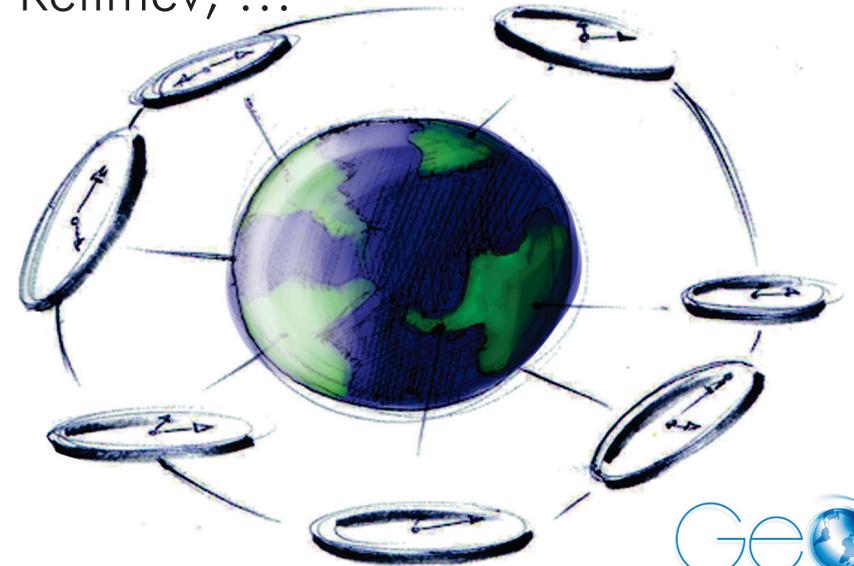


- ✓ **Transfert de Temps Sol-Sol en vue non commune**
- ✓ **Comparaison ELT - ACES – T2L2** : TT sol sol entre ACES et Jason 2
 - Planning : Quelques mois en commun avant fin 2016
 - ACES : moyens de transfert de temps
 - ELT : Erreur de répétabilité 45 ps ; $E < 100$ ps
 - MWL : $s_x = 0.3$ ps @ 300 s ; 7 ps @ 1 j ; 23 ps @ 10 j ; $E = 100$ ps
 - Comparaison des techniques de transfert de temps via T2L2
 - Comparaison MWL – T2L2
 - Comparaison ELT – T2L2
- ✓ **Bilan de liaison – Turbulence atmosphérique** : mesure du flux laser du lien montant et du lien descendant en prenant en compte la turbulence atmosphérique
Travail en collaboration Géoazur - Lagrange
- ✓ **Sonde lunaire LRO T2L2**



CONCLUSIONS

- × Objectifs de T2L2 en stabilité atteint :
→ 10 ps de 10 à 100s, env. 10 ps de 1 à 10 jours
- × Comparaison T2L2 / GPS (exactitude) : excellente performance
→ diff moyenne entre GPS et T2L2 < 300 ps (avec un σ de 500 ps du au GPS)
- × Comparaison avec T2L2 / TWSTFT : en cours
- × Perspectives long terme : ACES (MWL et/ou ELT), Refimev, ...
- × Apport de T2L2 :
 - Synchroniser les stations laser via le service UTC T2L2 → Exactitude : 1 ns
 - Participer à l'étalonnage des stations laser (Station d'étalonnage T2L2)



T2L2 l'équipe :

Géoazur - OCA

Sophia-Antipolis, Caussols –
France

D. Albanese: Optics

C. Courde: FTLRS

P. Exertier: Data Analysis CMS

M. Laas Bourez: TF Manager

JL. Oneto: TF Lab

J. Paris: Software

E. Samain: T2L2 PI

J.M. Torre: Laser stations ILRS

→ nombreux observateurs dévoués !

CNES

Toulouse-Paris – France

P. Guillemot: Mission Center CMI

S. Leon: Program

D. Said: Operation

D. Vergnoux: Quality



SYRTE - OP

Paris – France

J. Achkar: TT Comparison

P. Ulrich: GPS Comparison

D. Rovera: GPS Comparison