



Observatoire
de la CÔTE d'AZUR



Transfert de temps par laser de Jason2 à GRASP

P.Exertier, A. Belli, N.D. Luong, E. Samain, C. Courde,
UMR Geoazur, OCA, UNS Nice – Sophia Antipolis
F. Vernotte
Obs. de Besançon, UFC



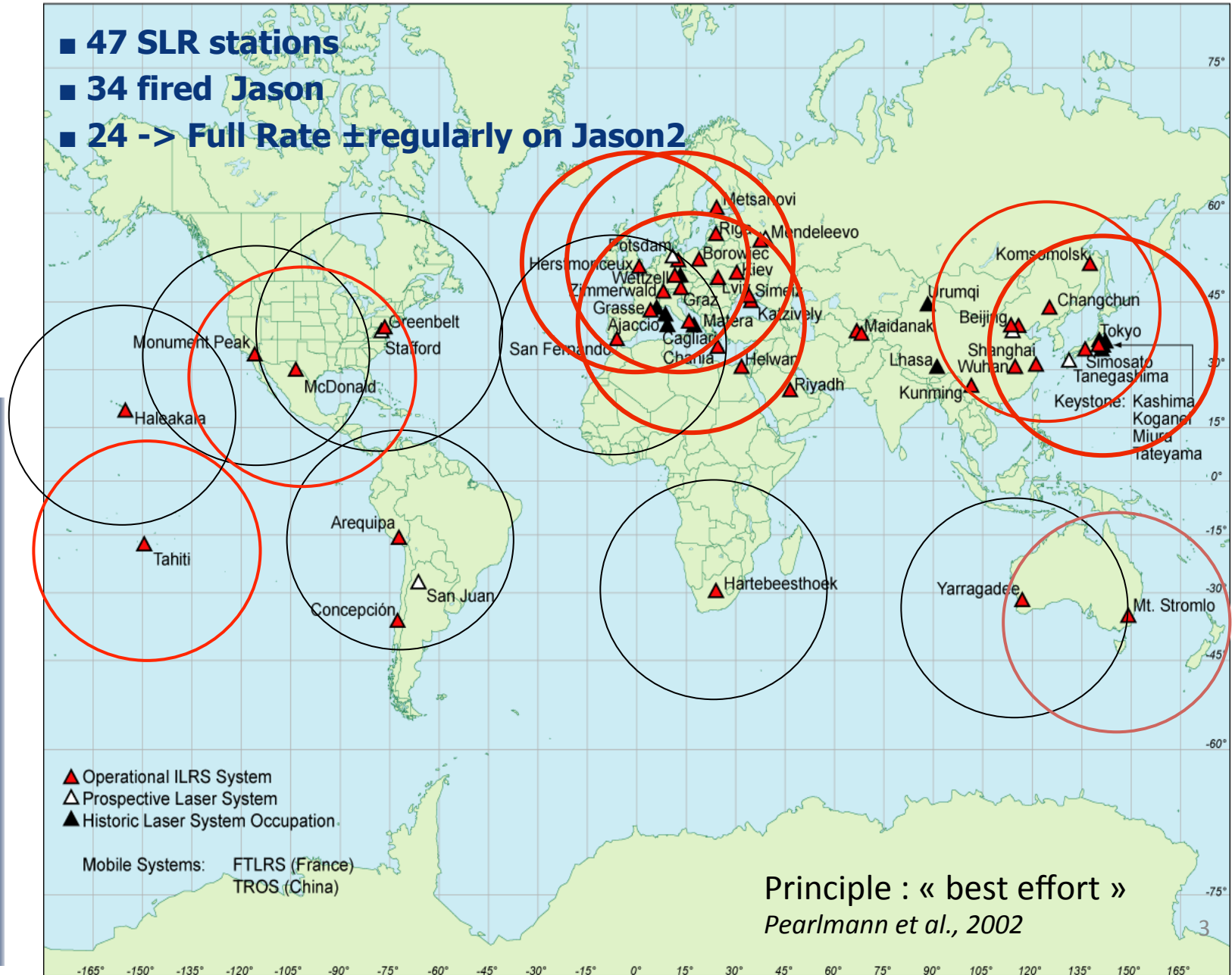
Transfert de Temps laser /T2L2

- Mission sur Jason2 (1335km, 66deg, 2008-2014)
- En vue commune: performances ultimes (10ps /60s // ~150ps)
 - Campagnes, et expériences au sol
- En vue non commune: DORIS !? (10^{-13} /1000 sec)
 - Observations peu disponibles; tests et propositions à la communauté en cours
- Applications du Transfert de Temps (TT):
 - Temps-Fréquence
 - Comparaisons d'horloges : sol-espace et sol-sol
 - Métrologie (en station)
 - Echelle de temps, et comparaisons sol-sol : laser/GNSS/TWTFT
 - Relativité
 - Géodésie Spatiale
 - Oscillateur bord (synergie entre plusieurs techniques spatiales à bord)
 - Troposphère et technique de navigation en utilisant le 1-way (\neq bord-sol)



Réseau laser de l'ILRS

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





Expérience acquise avec T2L2

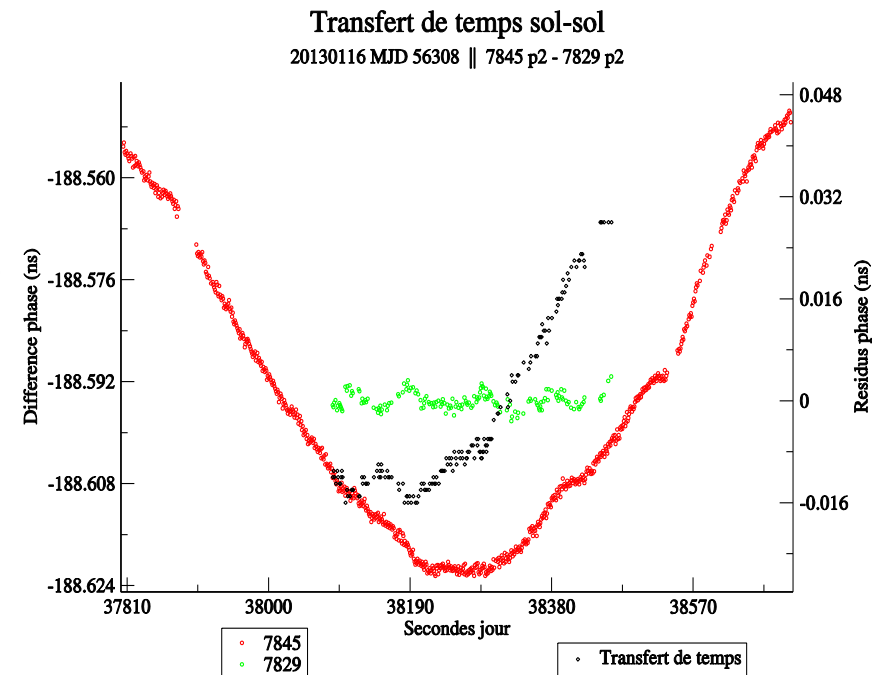
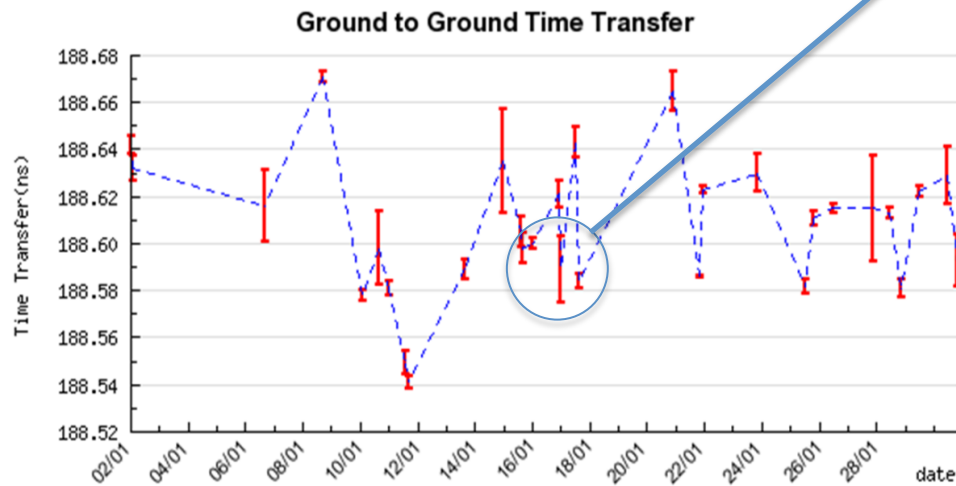
- Données complexes mais très performantes pour les aspects en Vue Commune (VC)
(*Samain et al., Metrologia 2014, Exertier et al., ASR2010, 2014*)
- Complémentarité des techniques GNSS et laser (en lien TT sol-sol), démontrée en VC
(dont avec solutions PPP) (*Guillemot et al., EFTF 2012*)
- Avancées sur la métrologie des laboratoires connexes: de télémétrie laser et de temps-fréquence
(*Laas-Bourez et al., IEEE-UFFC 2014*)
- T2L2 répond à un certain nombre de points concernant:
 - TT sol-sol en VC: performance ++ et intérêts entre stations / laboratoires (dont avec la station laser mobile)
 - Temps-Fréq.: comparaison T2L2 / GNSS (modes CV et PPP) sur le long terme
(*Rovera et al., Metrologia, 2014*)
 - Monitoring de l'oscillateur bord DORIS et TT en Vue non Commune
 - Physique fondamentale : à finaliser





Transfert de temps sol - sol

- ❖ Campagne interne Grasse : horloge identique au sol
 - ❖ Exactitude (*Samain et al., en préparation*) ~ 140 ps
 - ❖ Hte stabilité, long terme
- => erreur de répétabilité : 30 ps rms





Objectifs et critère de succès

Objectifs	Critère de succès	Perf. actuelle	Acquis	Attendue
Validation Transfert Sol Espace	$\sigma_x(0.1) = 65$ ps $\sigma_x(1000) = 1$ ps	$\sigma_x(1) = 65$ ps $\sigma_x(1000) = 10$ ps	x x	2010
Validation Transfert Sol-Sol en vue commune	$\sigma_x(1000) = 1.5$ ps $\sigma_x(1 \text{ j}) = 5$ ps	$\sigma_x(1000) = 10$ ps $\sigma_x(1 \text{ j}) = 20$ ps	x x	2012
Validation T2L2 Transfert Sol-Sol en vue non commune	$\sigma_x(300) = 150$ ps $\sigma_x(3000) = 2$ ns	$\sigma_x(300) = 150$ ps -	✓ x	- 2014-5
Inter-comparaison des liens RF : Stabilité des liens GPS PPP	$\sigma_x(10000) = 15$ ps $\sigma_x(1 \text{ j}) = 40$ ps	$\sigma_x(10000) = 20$ ps $\sigma_x(1 \text{ j}) = 20$ ps	x ✓	2013 -
Inter-comparaison des liens RF : Exactitude des liens (code)	$E = 1$ ns	$E = 100$ ps	✓	-

Exertier et al., 2010; 2014; Laas-Bourez, et al., 2014
Rovera et al., 2014; Samain, et al., 2014
Guillemot et al., 2010, 2011, 2012, 2013





Objectifs et critère de succès

Objectifs	Critère de succès	Perf. actuelle	Acquis	Attendue
Physique fondamentale Anisotropie vitesse de la lumière	$\sigma_x(1000) = 5$ ps > 3 mois	$\sigma_x(1000) = 10$ ps	✗	2015
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	✗ ✓	2014-5 -
Jason 2 : Télémétrie 1 voie	$\sigma_x(30) = 10$ ps Obs > 80 °	$\sigma_x(30) = 20$ ps 87°	✗ ✓	- 2015
Bilan de liaison	Reboucler mesure et modèle	Non évalué	✗	2015-16

*E. Samain and W. Touny, 2014
Exertier et al., Nice Q2C-6 2013*

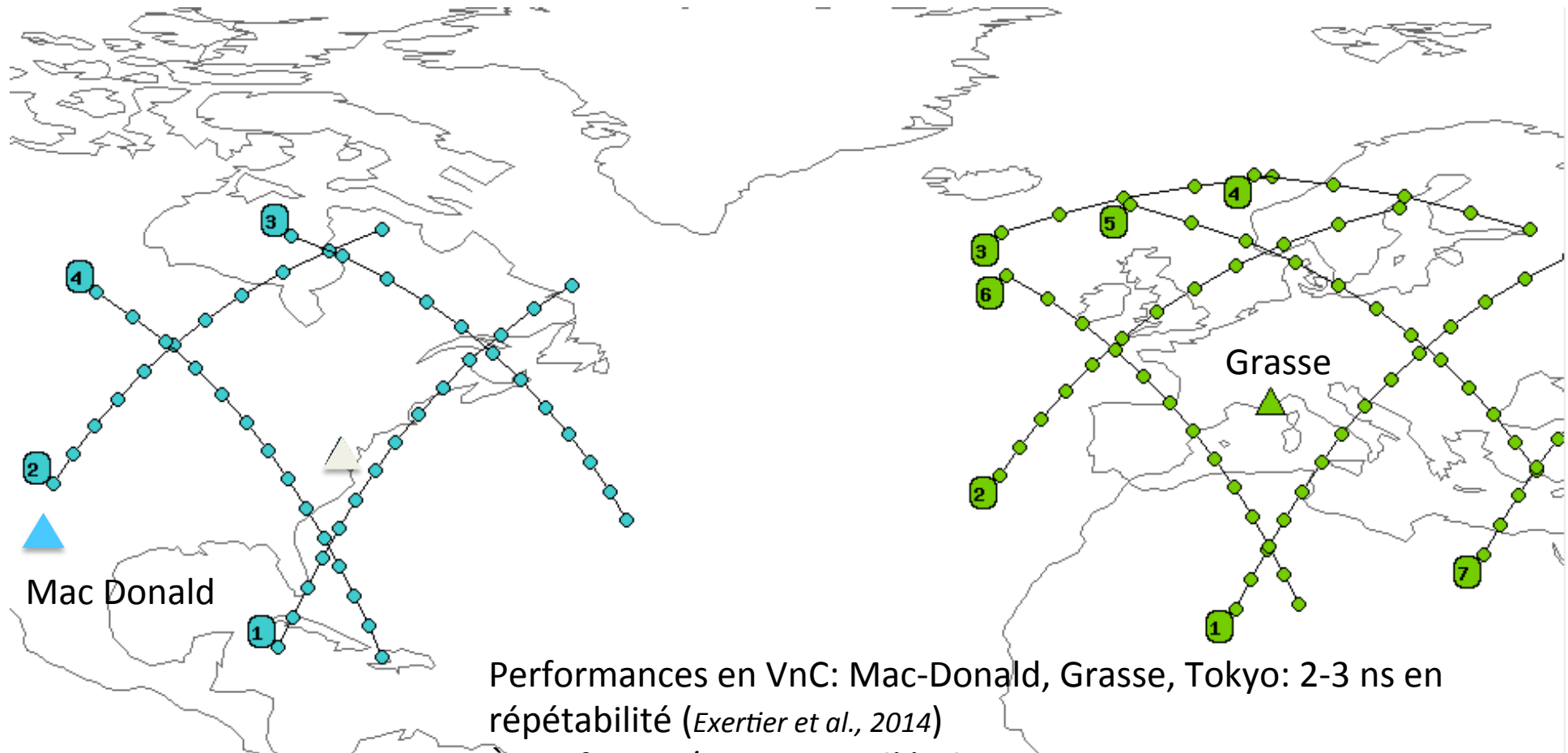
Belli, Exertier, Courde, CNES 2014





Configuration, non CV /Jason2

Jason-2 pass over N.Atlantic, Oct. 17 2013



Performances en VnC: Mac-Donald, Grasse, Tokyo: 2-3 ns en
répétabilité (*Exertier et al., 2014*)
À confirmer /campagne d'étalonnage



Observatoire
de la CÔTE d'AZUR



de Jason2 à GRASP



Le transfert de temps par laser

- GRASP: viendra après T2L2 /Jason2, après ELT /ISS *** (contacts et perspectives)
- 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)
- Une contexte multi-techniques à bord, dont un système DORIS, et une horloge Rubidium
- 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 **
Dimarçq, N. ibid 2013 * Schreiber, U., 2011 ***



Investigations

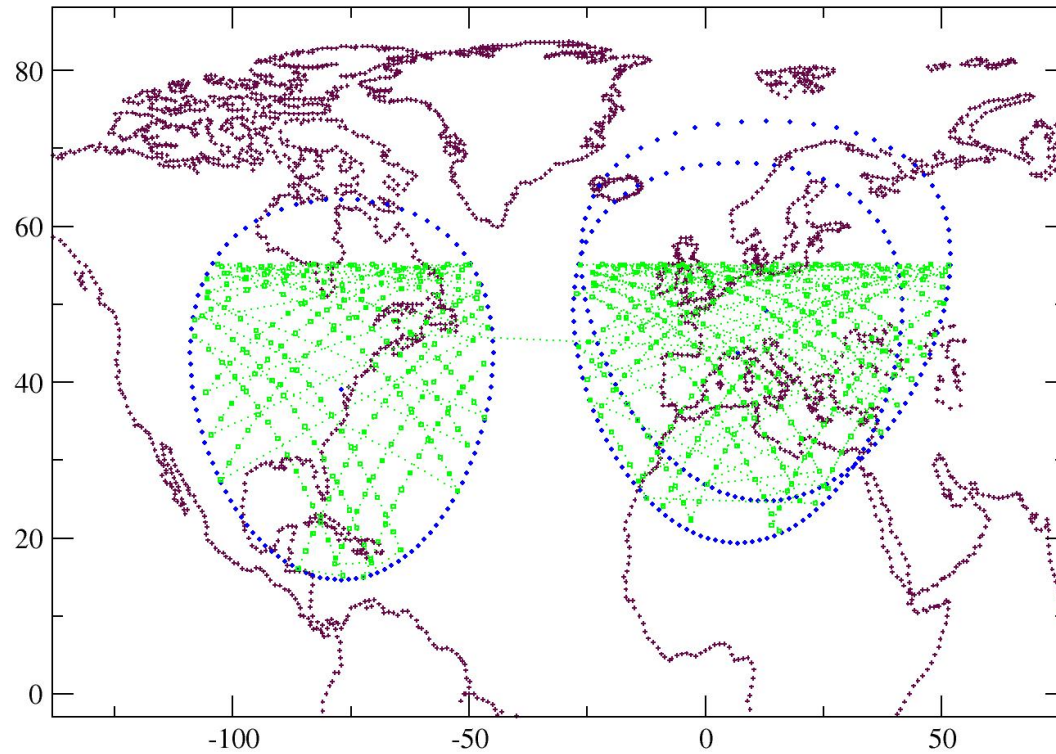
- Transfert de temps dit 2-way (mesure des triplets : dates départ et retour (échelle de temps en station), et date bord (échelle de temps bord))
- Prendre en compte différents aspects:
 - orbite, instruments (sol et bord), réseau au sol (permanent, voire avec stations mobiles)
 - Réalisme: bruits, statistiques (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)

*Wolf and Petit, 1995
Petit, G. EFTF 2013*

Orbite et réseau au sol

- Contraintes:
 - Vue Commune ++ et Vue non Commune réduite
 - Observabilité : durée des passages (suffisante pour l'intégration) > 1000 s
 - Nbre de passages possibles /jour
 - Élévation mini en station (pb du télescope)
 - Assurer la continuité (phase) entre différents passages
- Outils :
 - Orbite (scenario à 2000km, inclinaisons 55 et 75 deg, circulaire)
 - Réseau au sol : choisi parmi les stations laser existantes + station(s) mobiles
 - Tirages statistiques sur:
 - Passages, données intra-passages (+ cadence laser utilisées)
 - Choix de scenarii, pour chaque station
- Technologies disponibles (expérience avec T2L2) :
 - Laser (cadence, détecteur)
 - Dateurs et détecteur bord
 - Instruments disponibles à bord : réflecteurs laser (pour la mesure du 2-way - temps de montée), et DORIS, plus un oscillateur Rb-OUS

Orbites



Scenarii envisagés:
2000 km, 50° / 75°

Circulaire

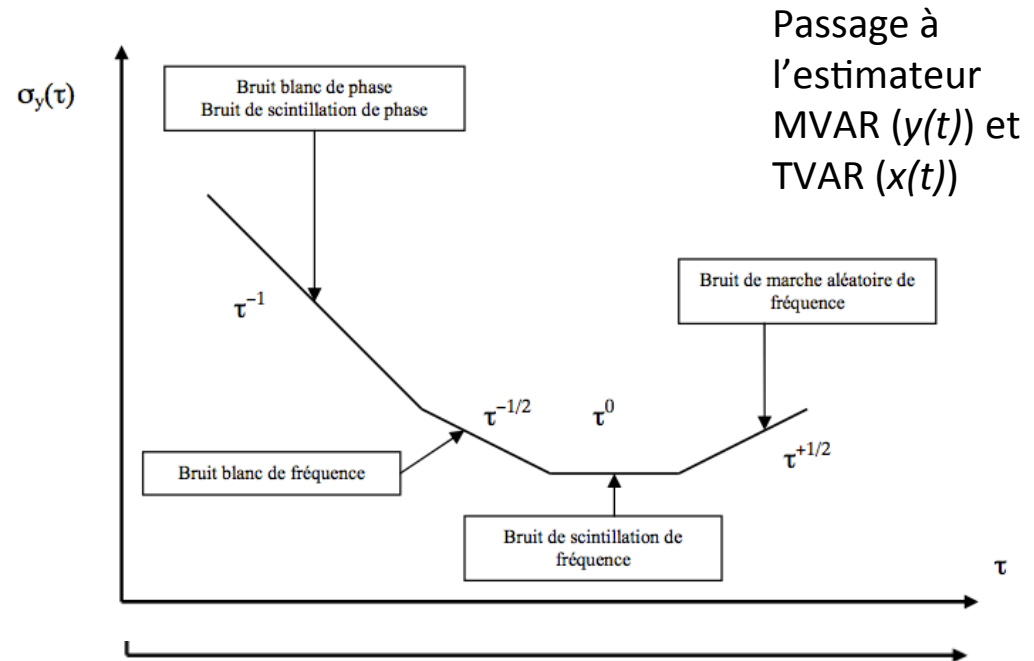
Visibilité station 15° / 20°

3 jours

Statistique: 0.85 sol et 0.65 bord

Oscillateurs et bruits

- Scenarii établis à partir des schémas classiques de densité spectrale et de variance d'Allan AVAR (en fait écart type $\sigma_y(t)$, ci-contre):
 - DORIS (à comparer à T2L2)
 - Horloge spatiale ultra-stable
 - Rubidium (et oscillateur composite) à bord

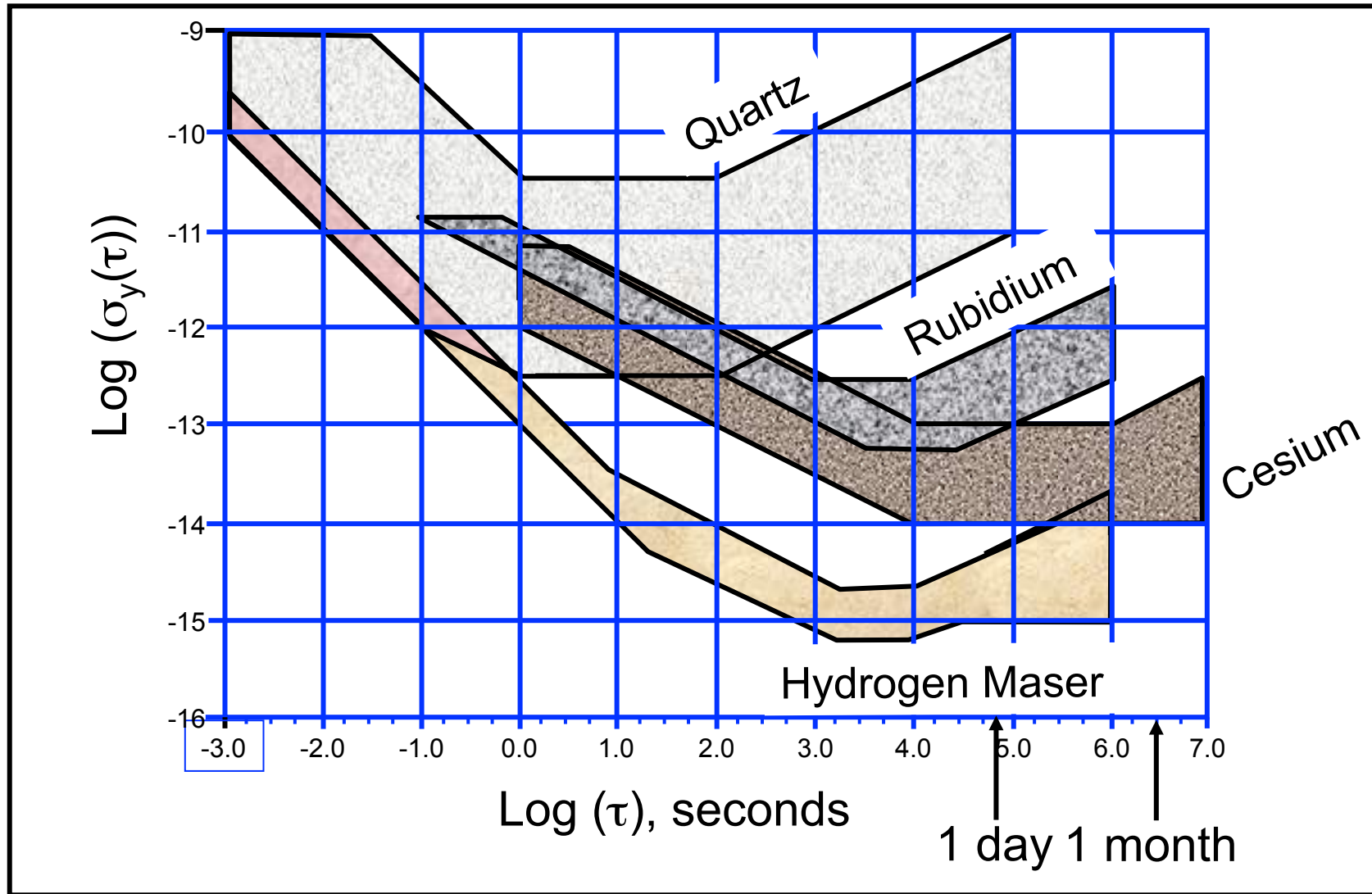


- Bruits dateurs et liens laser :
 - Objectif de 50 ps en sol-espace
- Synchronisations sol-sol < 100 ps (de l'ordre de 50 ps)
- Oscillateurs au sol, instabilités de type (Allan) :
 - H-maser : 10^{-15} @1000 s
 - Autres

Ulrich, P., ENS 2007
Vernotte, F., OCA 2014

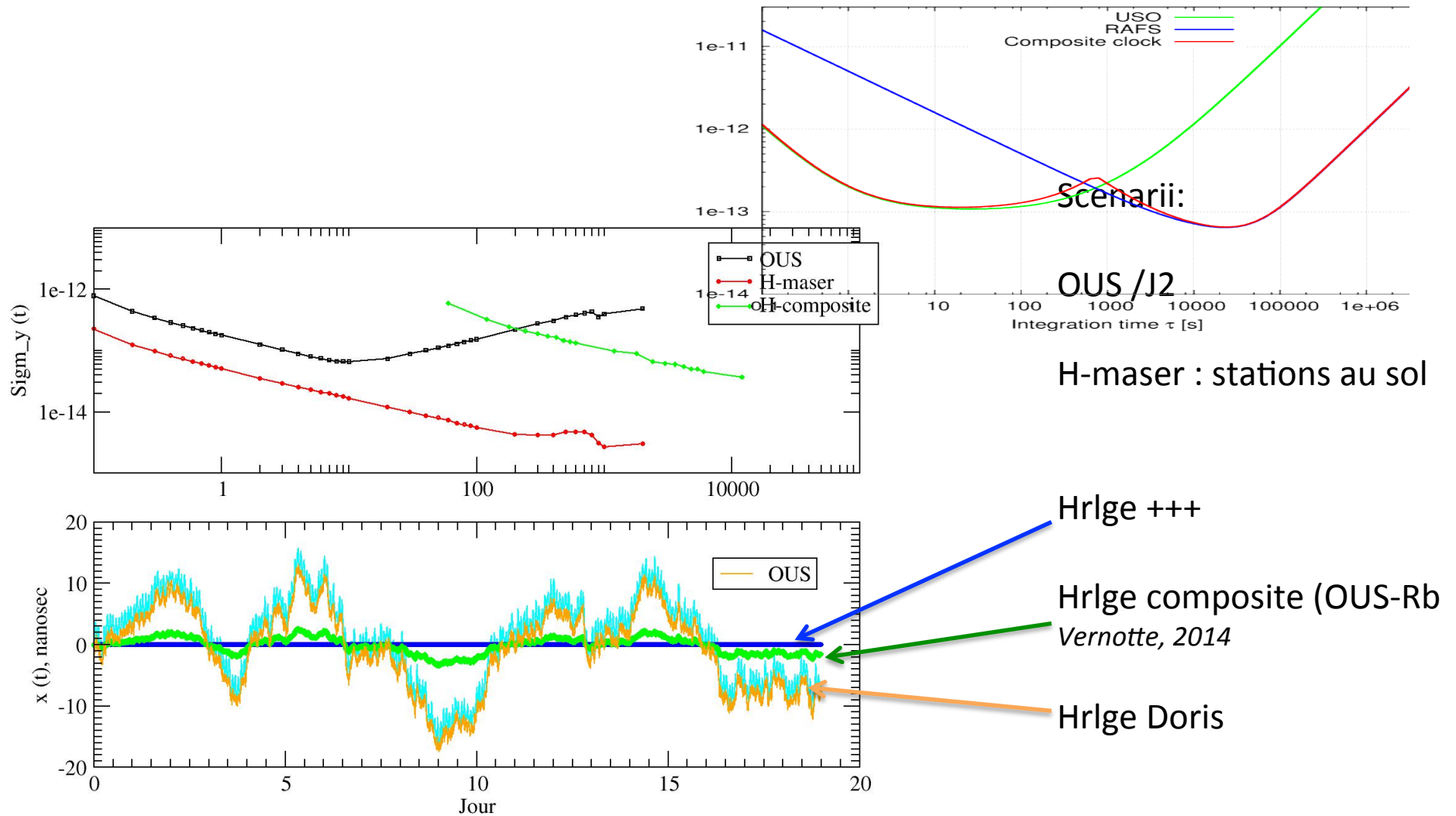
Rubiola, E., EFTF 2013

Stabilité de quelques "Frequency Standards"



Sydnor R., 1989 JPL, Van Melle, M. 1995

Estimations réalisées



Equation centrale

- Equation de TT :
 - Transfert de temps dit 2-way (mesure des triplets : dates départ et retour (éch. station), et date bord (éch. bord) :
 - Sol – espace:

$$\Delta_j^B \text{ ou } \Delta_k^B = t^B - (t_j - dt_j) + \Delta_j(0) + \Delta^B(0) + \text{corr}(j) + \text{corr}(B) + \text{RG}(B) + \text{RG}(j) + \Delta_j^{\text{TAI}}$$

- Sol – sol:

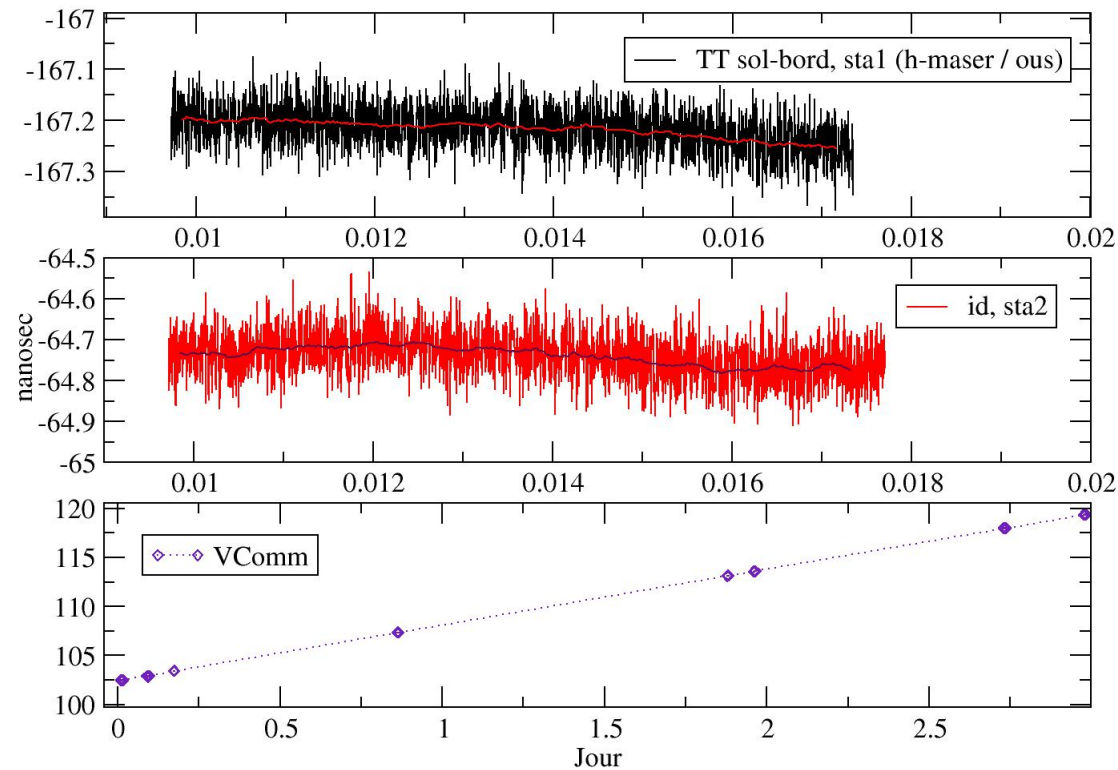
Exertier et al., 2014

$$\Delta_j^B - \Delta_k^B = \Delta_k^j = (t_k - dt_k) - (t_j - dt_j) + \Delta_k^j(0) + \text{corr}(j) - \text{corr}(k) + \text{RG}(j-k)$$

- Bruits de phase : du lien sol-espace, des dateurs / détecteurs
- Etalonnages : laboratoires T-Fréq., cables horloge-télescope laser-récepteur GNSS, etc.

Rovera et al., 2014

Etalonnage de la méthode /T2L2 en VC



OUS bord

TT bord-sol : 50 ps

Orbite J2

Stations laser :

Cadence 10Hz

Réception bord: 65%

H-maser

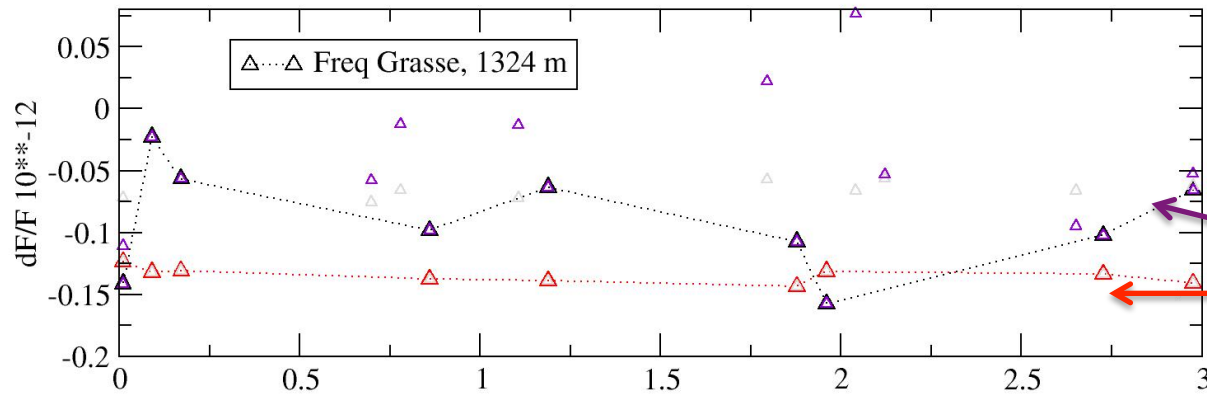
Bruits:

Lien 30-35 ps

Dateurs : 7 ps

Exact. \sim 50 ps

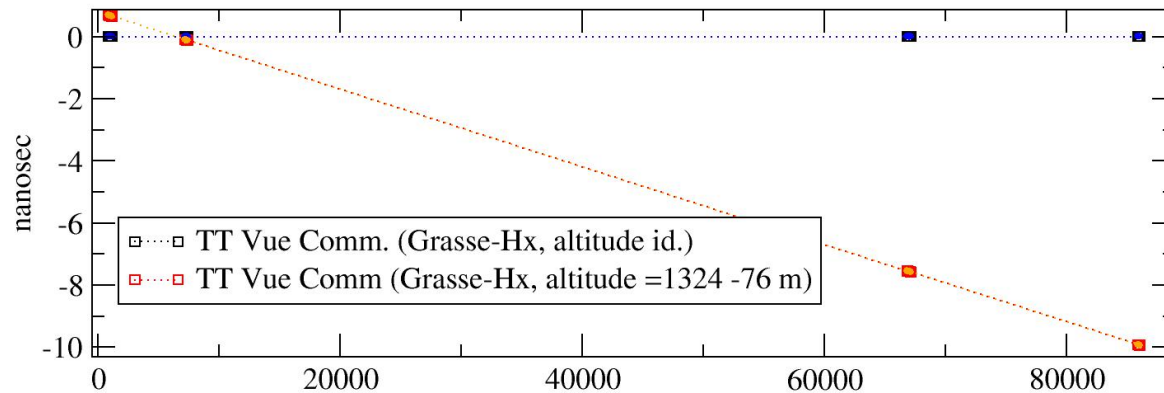
Test, en Vue Commune



Orbite GRASP
2 Stations laser
(altitude #); H-maser

Restitution de fréquence
OUS

HrIGE bord +++



TT en vue commune en
fonction du temps, peu
de # :

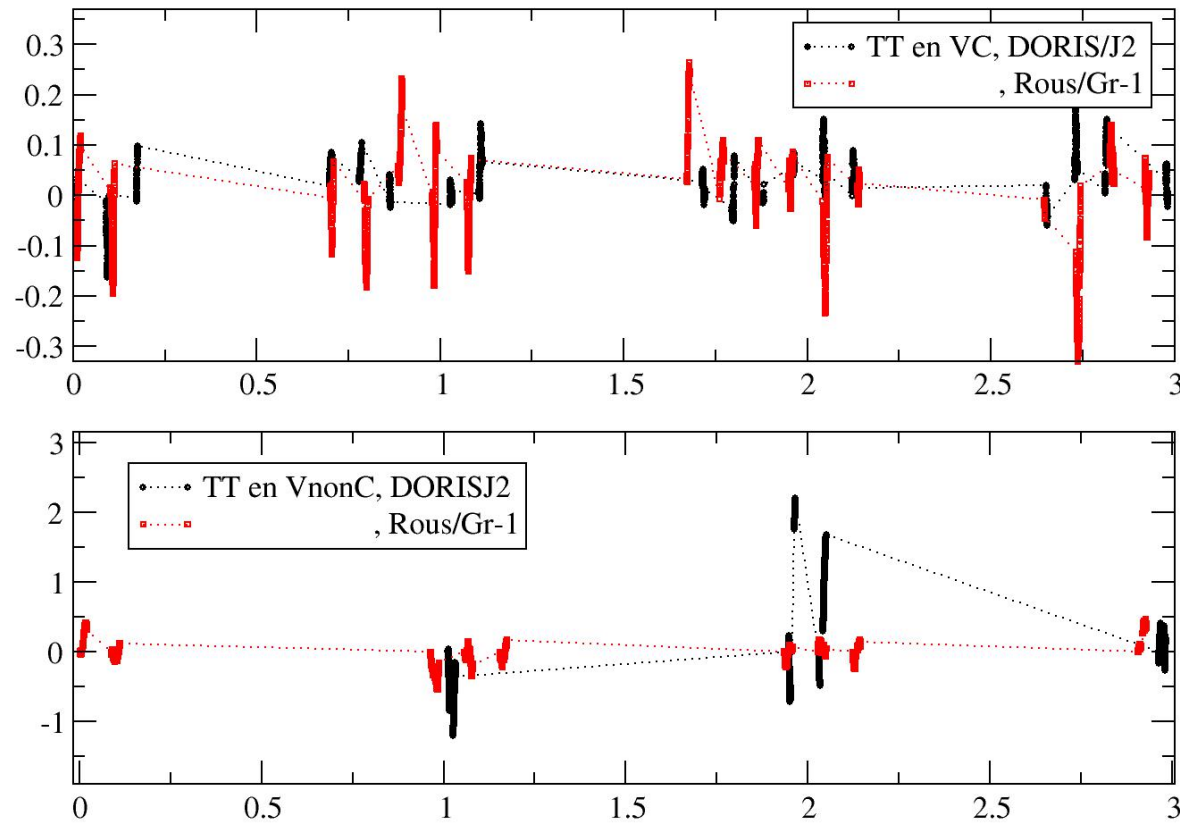
$s_y \sim 10 \text{ ps} / > 500 \text{ s}$

Répétabilité $\sim 20 \text{ ps}$

Prochazka, et al. 2014

Kodet, J., 2013

Test, en Vue non Commune



Orbite GRASP
2 stations laser (H-maser)
3 jours

Bord :

OUS /J2
Rb-ous : GRASP-1

Passages en VnC:
~800 sec

1ères conclusions

- GRASP à 2000 km :
 - Visibilités inter continentales accrues
- Horloge à Bord :
 - Composite ; OUS DORIS et Rb pour le moyen terme
- Stations/laboratoires au Sol:
 - Stations laser
 - Station(s) mobiles
 - Liens GNSS aux éch. de temps locales
- Outil d'analyse :
 - Doit être étalonné / bruits et stabilités envisagées
- Intérêts:
 - Meilleure TT en VnC (si DORIS-OUS et Rb à bord)
 - Physique fondamentale (voir session)

Inc > 50° / Inc < 70°

VC : 2 ps /1000s

Rb+OUS

VnC : 0.2 ns

Etalonnages : < 0.1 ns*

recomm. GGOS

GNSS (+ MWL ?)

Etalonnage -> ELT**

Multi-technique bord

Isotropie c ***

*Prochazka et al., 2014

**Schreiber et al., 2011

***Petit & Wolf



Intérêt du transfert de temps 1-way

- Démonstration /Jason2
 - Meilleure définition du point bord (~1 mm) /réflecteur laser (10cm)
 - Troposhère
 - Physique fondamentale
 - Lecture de l'oscillateur DORIS *Jayles, Ch., et al. 2014*
- GRASP :
 - Etude à mener : horloge, optique&détecteur bord, réflecteur et laser
 - Comparaison (géodésie spatiale) avec autres approches GRGS
- LRO :
 - Amélioration de la trajectographie -> champ de gravité Lune INPOP^
 - Synchronisation sol-sol, et VC Terre-LRO (Greenbelt – Grasse) T2L2 et SLRNG**
- Etude des passages – stabilités de ELT /ISS (ACES/Pharao) en VC
 - Outils d'analyses (comparaisons) ELT - T2L2*
- Autres (planétaire)

[^] *Fienga, Laskar and Exertier, 2014*

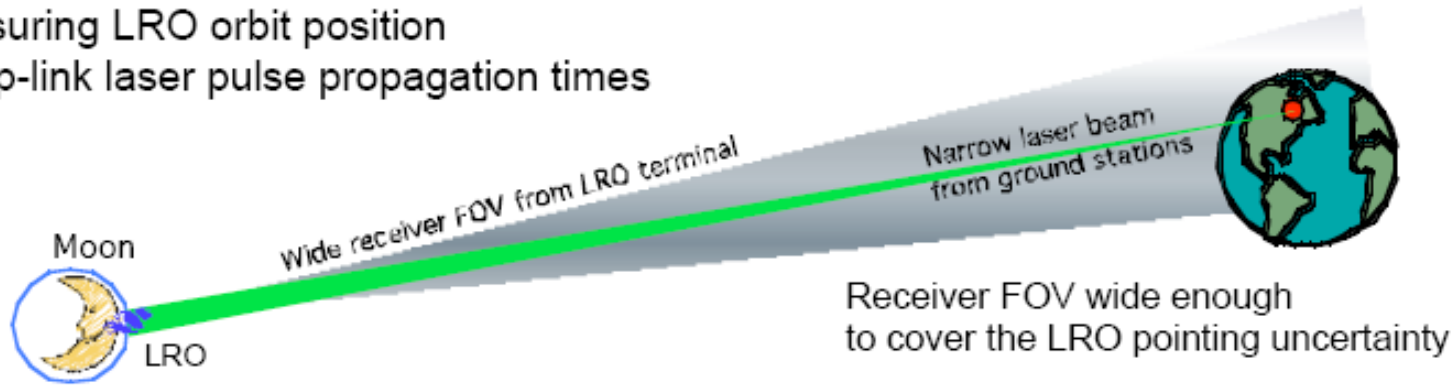
** *Mac Gary, J., 2014*

* *Schreiber et al., 2011*

* *Schlicht, et al., 2013*

Measurement approach

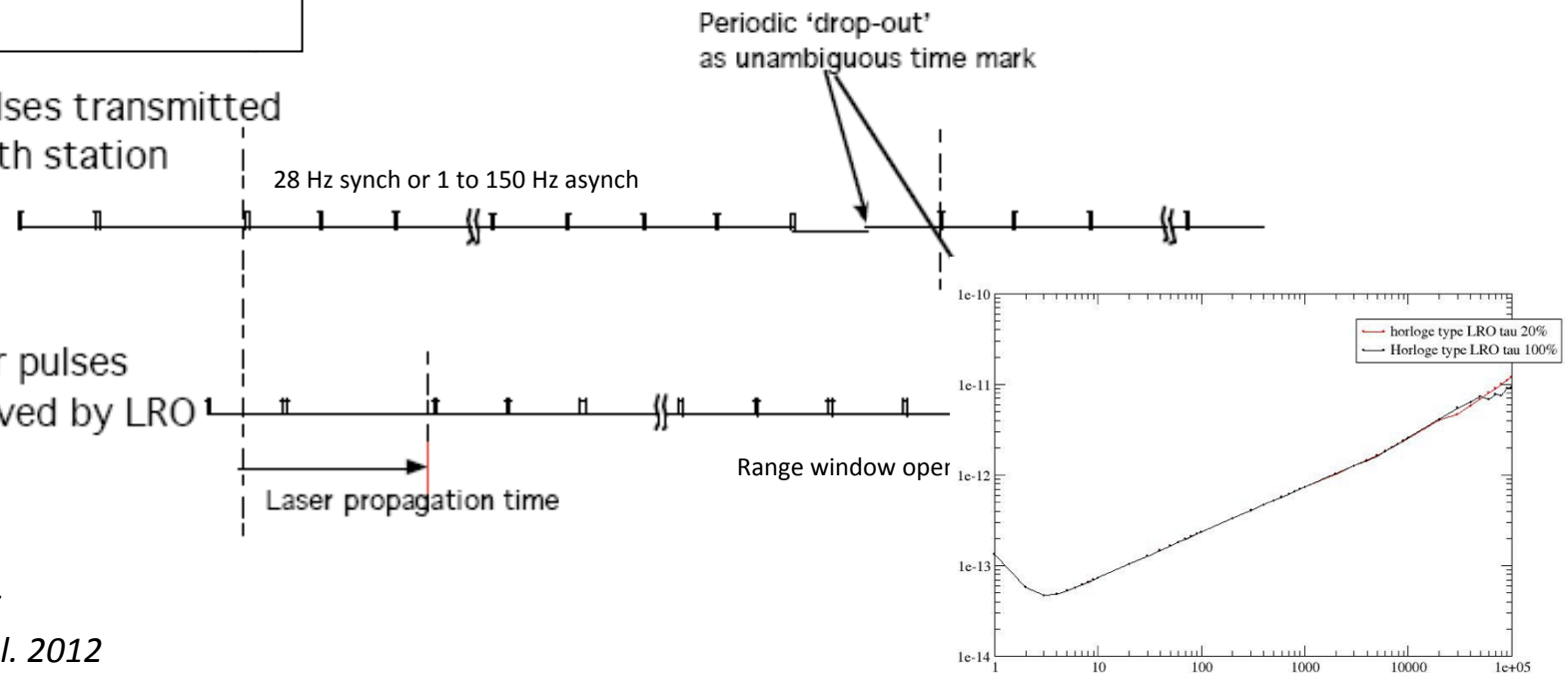
Measuring LRO orbit position
via up-link laser pulse propagation times



1-way laser ranging

Laser pulses transmitted
from earth station

Laser pulses
received by LRO



Merci

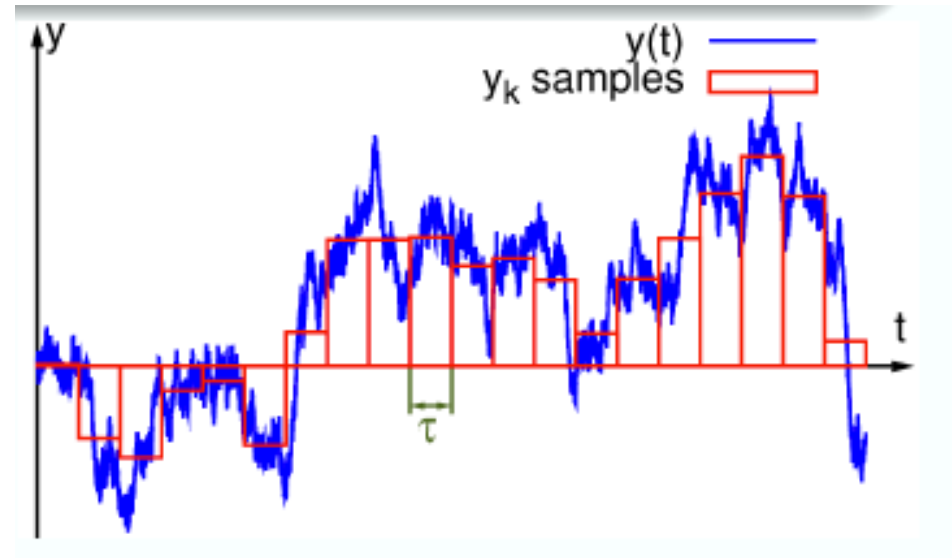
Transfert de temps

- Réseau au sol : 2-3 stations, H-maser disponibles et accès au TAI/UTC (/liens GNNS et étalonnages des stations)
- 2-3 jours maximum, sélection des données et passages selon différents scénarii stations/satellite
- Oscillateur spatial:
 - Ultra performant, type DORIS, autre (OUS-Rubidium)
- Dateurs et bruits
 - Différentes stabilités, bruits de phase et des liens sol-espace
- Environnement (géoïde, positions et vitesses) & relativité (U et v^2)
 - Géopotential, et altitude des stations au sol
 - Marées terrestres (signaux à $\pm 0.3\text{m}$) => répartition des stations sol (réseau étendu)
 - Possibilité (Grasse) de mesurer g (FG-5, Montpellier et Strasbourg) à $\pm 3\text{ mm}$
 - Repère de référence : ITRF2008, coordonnées à $\pm 1\text{ cm}$
- Echelles de temps (atomiques) : artificielles
- Pas de GNSS (pour le moment), ni de lien MW multi-fréquence

Outils et sources

- Caractérisation des oscillateurs testés:
 - intérêt de la DSP (relations de cause à effet)
 - Variance d'Allan AVAR

$$S_y(f) = \sum_{\alpha=-2}^{\alpha=+2} h_{\alpha} \times f^{\alpha}$$



où les h_{α} sont des coefficients indépendants de la fréquence.

A chaque terme correspond une modulation de bruit particulière :

- $\alpha = -2$: bruit de marche aléatoire de fréquence (Random Walk Frequency Noise) ;
- $\alpha = -1$: bruit de scintillation de fréquence (Flicker Frequency Noise) ;
- $\alpha = 0$: bruit blanc de fréquence (White Frequency Noise), ou bruit de marche aléatoire de phase (Random Walk Phase Noise) ;
- $\alpha = +1$: bruit de scintillation de phase (Flicker Phase Noise) ;
- $\alpha = +2$: bruit blanc de phase (White Phase Noise).

Ulrich, P., ENS 2007

Vernotte, F., OCA 2014