



Étalonnages relatifs des retards de chaînes de réception de signaux GNSS

Pierre Uhrich

**Ingénieur-chercheur LNE
LNE-SYRTE**

Observatoire de Paris, PSL Research University, CNRS,
Sorbonne Universités, UPMC, Univ. Paris 06

Pierre.Uhrich@obspm.fr

Commission GeoPos, IGN, 5 octobre 2017

- 1. Pourquoi des étalonnages des retards ?**
- 2. Étalonnages relatifs de stations ou de liens.**
- 3. Budgets d'incertitudes.**
- 4. Validation par comparaisons avec d'autres techniques.**

- **Géolocalisation ou radionavigation: le paramètre “temps” est éliminé dans les traitements par des techniques de double-différences (ou plus ...).**
- **Métrologie du temps et des fréquences: le paramètre “temps” est notre signal, le but étant de modéliser ou d’éliminer les autres paramètres et les perturbations.**
 - **Comparaisons de fréquence:** résultats donnés par une courbe de stabilité de fréquence relative (variance ou écart-type d’Allan).
 - **Comparaisons de temps:** il faut mesurer ou modéliser tous les retards de propagation qui ne peuvent être éliminés entre les points de référence des échelles de temps à comparer.

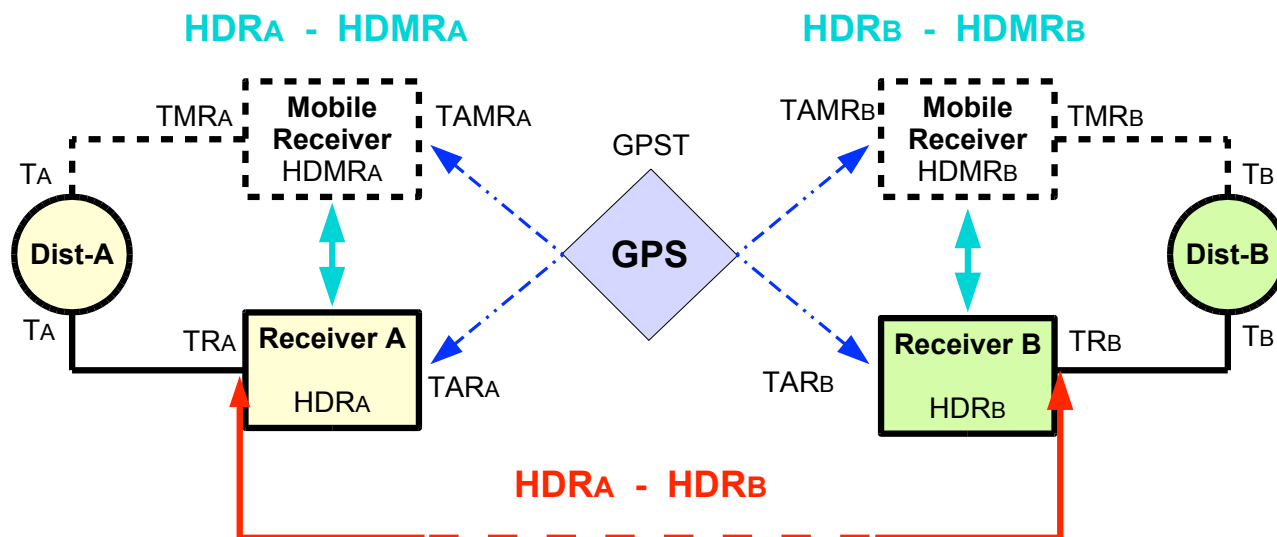
>>> **BUDGETS D’INCERTITUDES**

*dans lesquels les incertitudes sur les retards
« hardware » sont prépondérantes aujourd’hui.*

- **Différentes techniques de comparaisons à distance.**
 - **Vues communes (CV) utilisant un/des code/s.**
 - **« Ionosphere free » P3 CV** par combinaison linéaire de P1 et P2.
 - **« All in view »** en utilisant IGST (produits d'horloges de l'IGS).
 - **« Precise Point Positioning » (PPP)**, la plus stable, mais origine arbitraire des phases => retour à P3 pour les comparaisons de temps.
 - **Différents formats de données:**
 - RINEX pour les techniques PPP et des étalonnages.
 - « Common GNSS Global Time Transfer Standard » (CGGTTS) > « UTC(k) – GPSTime ».
- **Organisation internationale.**
 - Réseau pour le calcul du Temps atomique international (TAI), première étape du calcul du Temps universel coordonné (UTC), par le Bureau international des poids et mesures (BIPM).
 - Le BIPM sélectionne des laboratoires « Groupe 1 » (G1) par région métrologique, qu'il étalonne tous les deux ans.
 - Charge à ces laboratoires G1 d'étalonner les autres laboratoires « G2 ».
 - **EURAMET G1: LNE-SYRTE/OP** (France), **PTB** (Allemagne) et **ROA** (Espagne)
 - **≈ 30 laboratoires G2 en Europe !!**
- **Autres campagnes d'étalonnages pour des raisons scientifiques ou suite à une commande industrielle (Galileo, ...).**

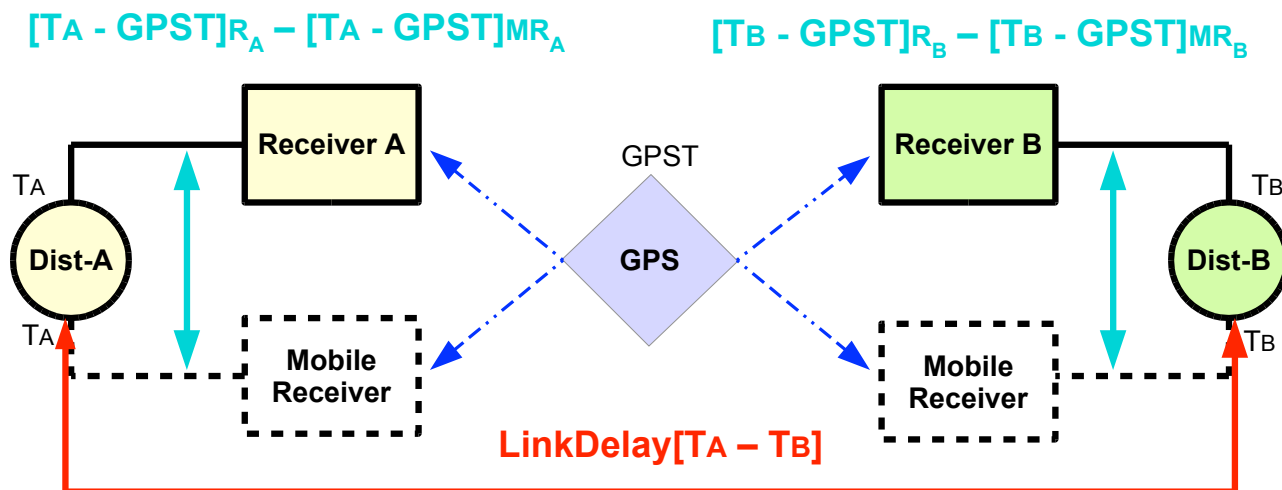
- **Étalonnage de stations:**
 - **Absolu:** mesures des retards de chacun des éléments d'une station (antenne, câble, unité centrale) avec l'aide d'équipements spécifiques (simulateur GNSS, ARV, chambre anéchoïque adaptée, ...) rares dans les laboratoires de métrologie [\gg *NRL/CNES*], incertitude combinée < 1 ns.
 - \gg Permet d'intégrer la station dans n'importe quel réseau.
 - **Relatif:** déplacement d'une station portable dans un réseau de laboratoires autour d'une station servant de référence.
 - \gg Permet d'intégrer la station dans un autre réseau si la station de référence de l'étalonnage relatif est étalonnée par rapport à cet autre réseau $>$ propagation des incertitudes (exemple G1/G2: incertitudes combinées conventionnelles $u_B(G1) = 1,7$ ns et $u_B(G2) = 2,5$ ns).
- **Étalonnage relatif de liens:**
 - Détermination d'un *offset moyen* à appliquer aux comparaisons entre deux points de référence d'échelle de temps distantes.
 - Moins de mesures à faire \gg meilleure incertitude.
 - Mais **étalonnage perdu si un changement hardware** intervient dans la distribution de l'échelle de temps locale.

- Étalonnage relatif d'une **station** par circulation d'un équipement voyageur.



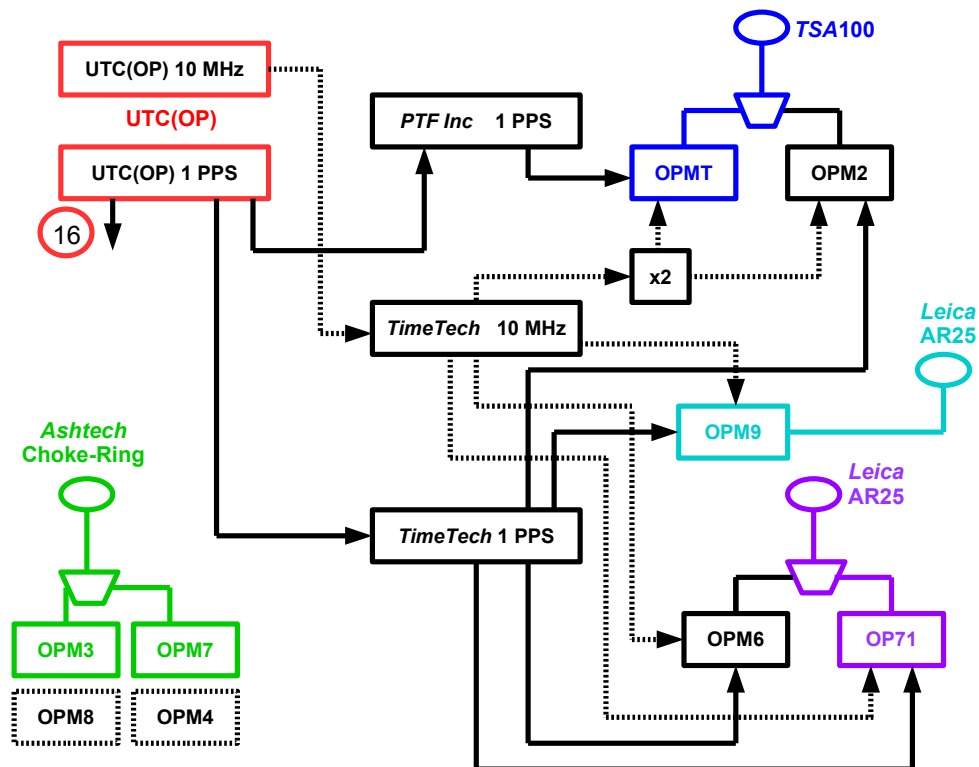
- Principe:**
 - Station mobile installée en parallèle avec station de référence.
 - Station mobile déplacée et installée en parallèle avec station à étalonner.
 - Retour de la station mobile aux côtés de la station de référence (> « clôture »).
 - Raccordement au même point de référence de l'échelle de temps locale (> mesure de retard) .
 - Calcul des coordonnées d'antenne par PPP sur fichiers RINEX (> écarts géométriques).
 - Calcul des écarts relatifs sur les codes P1 et P2 issus des fichiers RINEX entre la station visitée et la station de référence.
 - Estimation des incertitudes.

- Étalonnage relatif d'un **lien** par circulation d'un équipement voyageur.



- Principe:**
 - Circulation station mobile identique.
 - Retour de la station mobile aux côtés de la station de référence (> « clôture »).
 - Raccordement au même point de référence de l'échelle de temps locale (~~retards~~).
 - Calcul des coordonnées d'antenne par PPP (> écarts géométriques).
 - Calcul des écarts relatifs entre les fichiers CGGTTS P3.
 - Calcul d'un offset moyen entre les points de référence d'échelles de temps.
 - Estimation des incertitudes avec moins de lignes dans le budget.
 - Étalonnage perdu si changement hardware dans la distribution d'échelle de temps.

Implantation actuelle à OP: trois chaînes de réception GNSS.



>> Trois chaînes indépendantes étalonnées G1 par BIPM (#1001-2016):
OPMT, OPM9, OP71

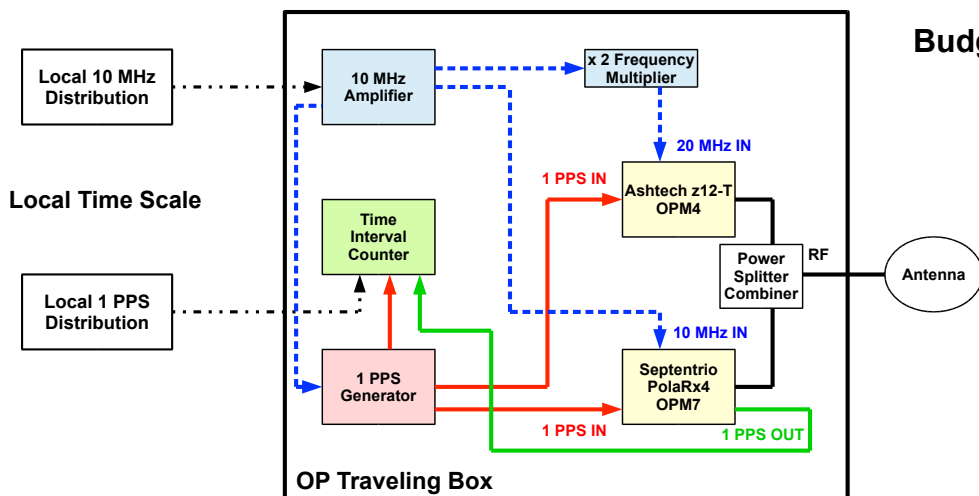
**BIPM
Calibration
Guidelines
v3**

Table 6. Uncertainty contributions. Values P3 are computed as $L1 + 1.55*(L1-L2)$

Unc.	Value L1 (ns)	Value L2 (ns)	Value L1-L2 (ns)	Value P3 (ns)	Description
u_a (T-V)	0.2	0.2	0.3		RAWDIF (traveling-visited)
u_a (T-R)	0.2	0.2	0.3		RAWDIF (traveling-reference)
u_a	0.3	0.3	0.4	0.7	
Misclosure					
$u_{b,1}$	0.5	0.6	0.2		observed mis-closure
Systematic components related to RAWDIF					
$u_{b,11}$	0.05	0.05	0.05		Position error at reference
$u_{b,12}$	0.05	0.05	0.05		Position error at visited
$u_{b,13}$	0.3	0.3	0.4		Multipaths at reference
$u_{b,14}$	0.3	0.3	0.4		Multipaths at visited
Link of the Traveling system to the local UTC(k)					
$u_{b,21}$	0.5	0.5	0		REFDLY _T (at ref lab)
$u_{b,22}$	0.5	0.5	0		REFDLY _T (at visited lab)
$u_{b,TOT}$	1.0	1.0	0.6	1.4	
Link of the Reference system to its local UTC(k)					
$u_{b,31}$	0.5	0.5	0		REFDLY _R (at ref lab)
Link of the Visited system to its local UTC(k)					
$u_{b,32}$	0.5	0.5	0		REFDLY _V (at visited lab)
$u_{b,SYS}$	1.2	1.2	0.6	1.5	Equation (3)
u_{CAL}				1.7	Composed of u_a and $u_{b,SYS}$
Antenna cable delays					
$u_{b,41}$	0.5	0.5	0		CABDLY _R
$u_{b,42}$	0.5	0.5	0		CABDLY _V

Étalonnage de liens ≠ étalonnages de chaînes de réception.

- **Liens entre deux points de référence d'échelles de temps distantes:** résultats sous forme d'un offset P3 par lien, limité à un réseau fermé, invalidé si panne de matériel (distribution,...), incertitude améliorée car moins de mesures sur sites.
- **Chaînes de réception GNSS:** résultats sous forme de retards P1 et P2 ensemble [antenne + récepteur], indépendant de la distribution des signaux, applicables pour toute liaison avec un autre site distant, incertitude P3 plus élevée car plus de mesures sur sites.
- **Étalonnage par LNE-SYRTE de trois liaisons européennes: OP, OCA et SGF*.**



Budgets d'incertitudes détaillés publiés.

Chaînes de réception (ns)

$u(\text{TAIP3 CV})$	$k = 2$
OP-OCA	2.5
OP-SGF	2.0
OCA-SGF	3.2

Liens (ns)

$u(\text{TAIP3 CV})$	$k = 2$
OP-OCA	2.1
OP-SGF	1.5
OCA-SGF	2.1

État de l'art

Rovera et al., « Link calibration against receiver calibration: an assessment of GPS time transfer uncertainties », *Metrologia* 51 (2014) 476-490.

*SGF: Space Geodetic Facility (Herstmonceux, GB)

Étalonnages relatifs du lien **OP-PTB** au cours du temps.

- **BIPM G1 #1001-2014**: Printemps 2015 [**BIPM 2015**]
- **NIST-OP-PTB**: Automne 2015 [**NIST 2015** et **OP 2015**]
- **Galileo-TGVF**: Printemps 2016 [**OP 2016**]
- **BIPM G1 #1001-2016**: Automne 2016 [**BIPM 2016**]

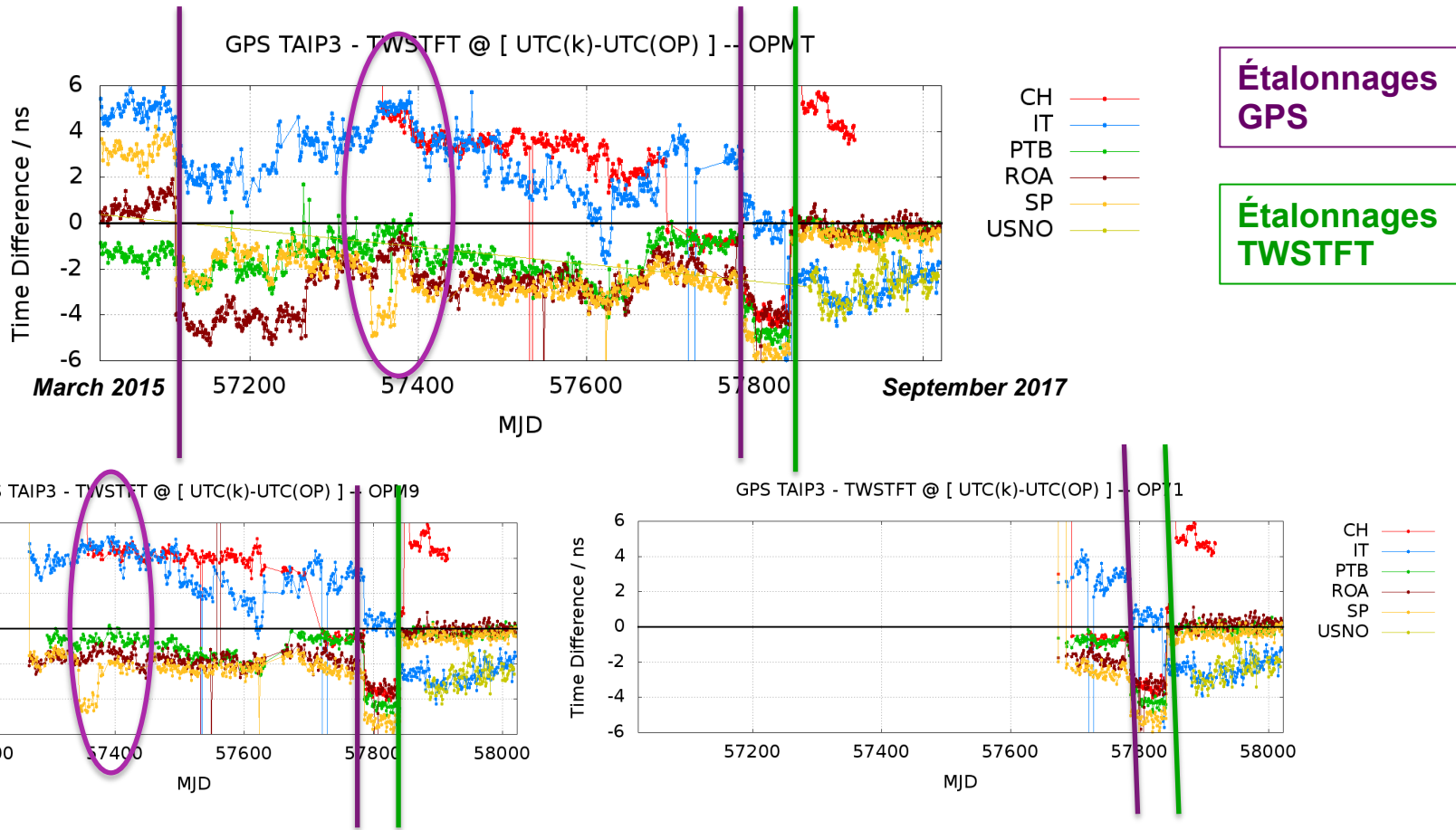
PTBB - OPMT	$\Delta P1$	$\Delta P2$	$\Delta P3$
Differences NIST 2015 – BIPM 2015	3.6	3.0	4.6
Differences NIST 2015 – OP 2016	2.0	1.7	2.4
Differences OP 2015 – BIPM 2015	2.0	1.3	3.1
Differences OP 2015 – NIST 2015	- 1.6	- 1.6	- 1.5
Differences OP 2016 – BIPM 2015	1.6	1.3	2.2
Differences OP 2016 – OP 2015	- 0.4	0.0	- 0.9
Differences BIPM 2016 – BIPM 2015	1.8	1.2	2.7
Differences BIPM 2016 – NIST 2015	- 1.8	- 1.7	- 1.7
Differences BIPM 2016 – OP 2015	- 0.2	0.0	- 0.2
Differences BIPM 2016 – OP 2016	0.2	0.0	0.7

- **Résultats cohérents** avec l'incertitude combinée conventionnelle G1 dans la Circulaire T $u_B = 1.7$ ns **sauf pour BIPM G1 #1001-2014.**
- **Fluctuations des récepteurs: OPMT ? PTBB ? Les deux !!**

- « **Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer** » (TWSTFT):
 - **Moyen « deux-voies » par satellite de télécommunication.**
 - **Bandes 12-14 GHz.**
 - **Quasi-simultanéité des trajets > compensation des retards.**
 - **Plus complexe et plus cher que GNSS.**
 - **Incertitudes combinées des liens TWSTFT dans la Circulaire T du BIPM $\approx 1,0$ ns à 1,5 ns.**
- « **Time Transfer by Laser Link** » (T2L2):
 - **Laboratoire Géoazur de l'Observatoire de la Côte d'Azur (OCA) avec le soutien du CNES.**
 - **Station mobile UMLS de l'OCA.**
 - **Système embarqué à bord d'un satellite en orbite basse (Jason-2).**
 - **Incertitude élargie ($k = 2$) de l'étalonnage hardware pour la comparaison sol-sol en vue commune ≈ 400 ps *.**
 - **Météo !!!**

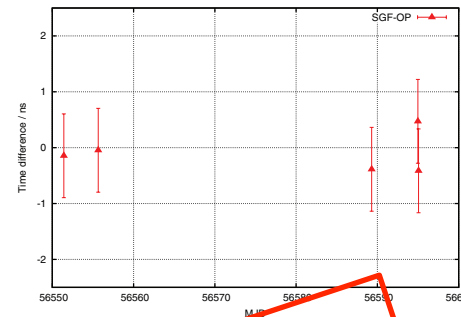
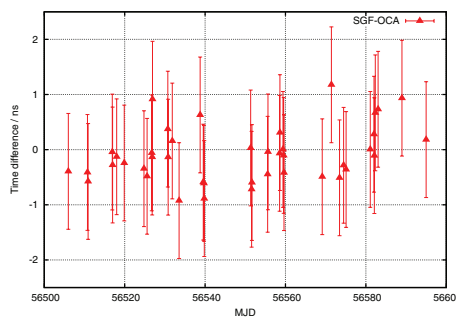
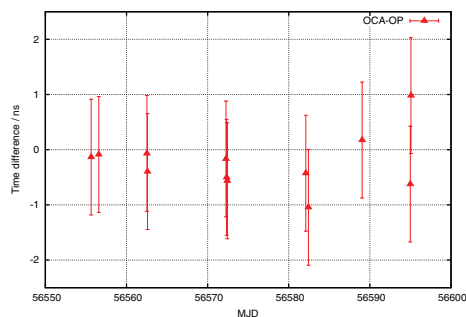
* Samain et al., « Time transfer by laser link: a complete analysis of the uncertainty budget », *Metrologia* 52 (2015) 423-432.

A. Différences P3 CV – TWSTFT avec pour pivot: OPMT, OPM9 ou OP71.



B. Comparaison directe GPS P3 CV - T2L2.

- GPS CV et T2L2 entre trois stations européennes: LNE-SYRTE/OP, OCA et SGF (Herstmonceux, GB)
- Station laser mobile de l'OCA installée à l'OP.
- Deux techniques étalonnées en temps de manières indépendantes: liens GPS étalonnés par LNE-SYRTE/OP et liens T2L2 étalonnés par Géoazur/OCA.
- Incertitudes combinées dominées par les liens GPS.



Lien	Nombre de points	Moyenne (ns)	Écart-type données GPS (ns)		Incertitude combinée (ns)
			CV brutes	CV filtrée	
OCA-OP	12	0,24	0,48	0,25	1,1
OCA-SGF	42	0,09	0,49	0,37	1,1
OP-SGF	5	0,10	0,32	0,32	0,8

État de l'art

Exertier et al., « Sub-ns time transfer consistency: a direct comparison between GPS CV and T2L2 », Metrologia 53 (2016) 1395-1401.

Étalonnages relatifs des retards de chaînes de réception de signaux GNSS.

En guise de conclusion:

- Treize ans que nous avons une **station IGS** implantée à l'OP raccordée à une très bonne référence externe (aujourd'hui UTC(OP)).
- Dix ans que le LNE-SYRTE/OP est chargé des étalonnages relatifs des liaisons GPS dans le **segment sol de Galileo**.
- Le LNE-SYRTE/OP est laboratoire du Groupe 1 dans la récente réorganisation des étalonnages GNSS par le BIPM/EURAMET.
- Membre actif du Groupe de travail du CCTF sur les GNSS.
- **Multi-GNSS** en cours d'implantation à l'OP.
- **État de l'art** pour les étalonnages relatifs et les comparaisons directes avec d'autres techniques complètement différentes.
- Prêts pour les comparaisons avec de nouvelles techniques: liens fibrés, liens sol-sol ACES, ...
- Démarrage collaboration avec le CNES sur les **étalonnages absolus**.

- **En partie grâce aux progrès de UTC(OP), l'une des trois meilleures réalisations indépendantes de l'UTC (avec PTB et USNO).**

Rovera et al., « UTC(OP) based on LNE-SYRTE atomic fountain Primary Frequency Standards », *Metrologia* **53** (2016) S81-S88.

Étalonnages relatifs des retards de chaînes de réception de signaux GNSS.

- L'équipe Métrologie du temps du LNE-SYRTE à l'Observatoire de Paris:
 - Joseph Achkar (Ingénieur-chercheur LNE, responsable TWSTFT)
 - Pierre Urich (Ingénieur-chercheur LNE, responsable GNSS)
 - Giovanni Daniele Rovera (Ingénieur-chercheur LNE)
 - Philip Tuckey (Astronome, responsable EGNOS)
 - Michel Abgrall (Ingénieur de recherche CNRS, responsable des Références nationales de temps)
 - Baptiste Chupin (Ingénieur MENSUR)
 - Olivier Chiu (Technicien MENSUR)
- Remerciements à P. Defraigne (ORB) pour la mise à disposition de son logiciel de transformation des données RINEX au format CGGTTS **.
- Nous utilisons le software PPP du NRCAN pour le calcul des coordonnées d'antennes ***.
- Nous utilisons des produits de l'IGS pour nos calculs d'étalonnage.
- La Section du Temps du BIPM réalise les étalonnages G1 (et beaucoup d'autres choses aussi...).

** Defraigne P. & Petit G., « Time transfer to TAI using geodetic receivers », *Metrologia* **40** (2003) 184-194.

*** Kouba J. & Héroux P., « Precise point positioning using IGS orbit and clock products », *GPS Solut.* **5** (2001) 12-28.