





# Le développement des stations SLR en vue de l'exactitude millimétrique

Séminaire GRGS sur la géodésie millimétrique – Sorèze 2015 CNRS - GéoAzur - OCA - UNS Astrogéo – France

C. Courde & Astrogeo Team

## Performances métrologiques des instruments

Termes communément utilisés : Exactitude & Précision

- Le terme français « précision » n'existe pas en métrologie
  - L'exactitude ne s'exprime pas numériquement

Définition (tiré de Vocabulaire international de métrologie, BIPM, JCGM 200:2012(E/F))

- Exactitude de mesure (Measurement accuracy) : Étroitesse de l'accord entre une valeur mesurée et une valeur vraie d'un mesurande. L'exactitude de mesure n'est pas une grandeur et ne s'exprime pas numériquement. Un mesurage est quelquefois dit plus exact s'il fournit une plus petite erreur de mesure.
- Justesse de mesure (Measurement trueness) : étroitesse de l'accord entre la moyenne d'un nombre infini de valeurs mesurées répétées et une valeur de référence. La justesse n'est pas une grandeur. La justesse de mesure varie en sens inverse de l'erreur systématique mais n'est pas liée à l'erreur aléatoire
- Fidélité de mesure (Measurement precision) : étroitesse de l'accord entre les indications ou les valeurs mesurées obtenues par des mesurages répétés du même objet ou d'objets similaires dans des conditions spécifiées. La fidélité est en général exprimée numériquement par des caractéristiques telles que l'écart-type, la variance ou le coefficient de variation dans les conditions spécifiées. La fidélité sert à définir la répétabilité de mesure, la fidélité intermédiaire de mesure et la reproductibilité de mesure.



faible fidélité haute justesse



haute fidélité faible justesse



haute fidélité haute justesse

=> Plus exact



- 1. Principe de fonctionnement
- 2. Performances métrologiques des stations SLR
- 3. R&D pour atteindre une incertitude millimétrique



# Performances métrologiques des stations SLR

Precision of the Graz laser station (kHz repetition rate)
[I. Prochazka, 17th ILRS Workshop, 2011]

SLR ranging precision (Graz 2011)







# <sup>®</sup>L'atmosphère

 $D = (t \downarrow arriv ee - t \downarrow de part).c/2$ 

avec

 $c = c \downarrow 0 / n(\lambda, T, Pv, Pa, CO \downarrow 2)$ 

Indice de l'atmosphère => Varie au cours de la propagation Paramètres météorologiques inconnus au cours de la propagation

Actuellement pour la majorité des stations SLR :

- Mesure du temps de vol à une longueur d'onde
- Mesure au niveau de la station des paramètres météorologiques
- Utilisation d'un modèle d'indice atmosphérique

Compte tenu :

- Des erreurs de mesure dans les paramètres météo (± 0,1 mb, ± 0,5°C, ±5-10% d'HR)
- De la différence entre les profiles verticaux réels et modélisés
- Des gradients transverses non pris en compte
- Des effets locaux et saisonniers



Incertitude ~ cm

# R&D pour atteindre une incertitude millimétrique

Télémétrie laser 2 couleurs + mesure de la densité de vapeur d'eau

77U

$$2D = R1 + \nu (R1 - R2) + (\nu R \downarrow 21 - \kappa \downarrow 1) + H \downarrow 21 SIWV$$

Effet de dispersion (atmosphère sèche) Courbure des faisceaux optiques Effet de la densité de vapeur d'eau

#### Incertitude mm possible avec une amélioration significative de la fidélité de mesure

Fidélité à atteindre pour chaque longueur d'onde



From D. D. Wijaya et al., Springer Verlag, 2011

# **R&D** pour atteindre une incertitude millimétrique

- Precision of the Graz laser station (kHz repetition rate)
- [I. Prochazka, 17th ILRS Workshop, 2011]

77U

- Pour obtenir une incertitude mm, nous devons :
- Améliorer d'un facteur 10 la fidélité ce qui requiert d'augmenter la cadence le mesure d'un factor st bloc est blanc
  - Être capable d'atteindre ces performances pour deux longueurs d'ondes



# R&D pour atteindre une incertitude millimétrique

[G. Kirchner, 17th ILRS Workshop, 2011]

AZU



# Travaux en 2014

#### R&D sur les détecteurs simple-photon à haute cadence Collaboration avec Politecnico di Milano

- Si-SPAD à 532 nm
- InGaAs/InP-SPAD à 1064 nm

Avec le soutien financier de l'INSU (GRAM) et du CNES

1<sup>e</sup> campagne de mesure en Octobre 2014

*Objectif : vérifier les performances instrumentales de 2 détecteurs simple photon haute cadence en laboratoire* 

Résultat :

Le bruit de l'ensemble de la chaîne instrumentale est blanc => la fidélité de mesure diminue en racine du nombre de points

TVAR=300 fs @ 5 s TVAR=250 fs (75 µm)@ 8s Pour une cadence laser de 10 kHz





# Travaux en 2015 : Télémétrie LLR en IR

#### Second détecteur infrarouge testé en conditions réelles



#### **Bénéfices :**

Grâce à la densification des Observations :

- amélioration des contraintes sur la libration,
- amélioration de la modélisation des effets liés au marée
- gain d'un facteur 3 sur sur l'erreur formelle sur le terme principal du signal induit par une violation du Principe d'Equivalence

#### (Viswanathan et al. 2015)

# Travaux en 2015 : Évolution GINS pour LLR/IR au mm

- Méthode : Validation du code par comparaison avec simulation INPOP/OP (H. Manche) => ok à 0.1 mm
  - Effets considérés:
- Entrées GINS au mm (positions stations/réflecteurs, données atmosphériques)
- EOP, marées terrestres solides, océaniques, effets de charge
- Effets propres à la Lune (LCRS, marées solides lunaires)
- RG, réfraction

## Travaux en 2015 : Par rapport aux données réelles (Viswanathan et al. 2015)



a. The Planetary and Lunar Ephemeris DE430 and DE431 : Williams et al, 2014
b. GINS LLR Analysis : with DE430 as ephemeris

AZU



#### EMPIR Call 2015 – Health, SI, Normative and Research Potential

Selected Research Topic number: **SRT-s10** Version: 1.0



### Title: Dimensional metrology for geodesy and surveying

=> Sélectionné au premier tour

#### => Deuxième étape : rédaction du projet à soumettre pour Octobre 2015

# Merci pour votre attention



#### *Stella* Ø=24cm, 60CCR, 48kg



## **Rétro-réflecteur laser**



Rétroreflecteur laser (CCR)



#### *Apollo XI* 46x46cm<sup>2</sup>, 100CCR

*GPS* 239x194x37mm (32CCR)



*ERS-1* Ø=20cm, 9CCR





Broadening of the pulse width (FWHM) by as much as 100ps

## Signature des satellites

Question :

Est il possible d'exploiter les réponses impulsionnelles des satellites au niveau millimétrique ?

#### Oui mais sous conditions

Connaître la station laser qui observe et le pré traitement réalisé pour le calcul des points normaux Tiré du site de l'ILRS :

ref: Otsubo and Appleby, "System-dependent centre-of-mass correction for spherical geodetic satellites" Journal of Geophysical Research, 108, B4, 2201, doi:10.1029/2002JB002209, 2003.

The standard LAGEOS center-of-mass correction is 251 mm

correction for single photon systems

edit level of npt when npt formed	com (mm)
none	242
3.0	245
2.5	247
2.0	250

correction for leading-edge-half maximum systems (mm)

FWHM pulse width (ps)	com (mm)		
1	256		
100	252		
300	248		
1000	244		
3000	243		

En fonction du type de détections et du niveau de filtrage => corrections qui diffère de plusieurs mm



Solutions garantissant la meilleure exactitude

Travailler en régime de simple-photon

Exploiter des impulsions laser de 10 ps FWHM pour résoudre les différents coins de cube du réflecteur

Travailler à haute cadence pour avoir la meilleure statistique

Travaux récents :

A method to calculate zero-signature satellite laser ranging normal points for millimeter geodesy - a case study with Ajisai, Kucharski et al. Earth, Planets and Space (2015) 67:34

## La détection

ηΖU

Photodétection de départ : réponse linéaire pin InAsGas ; précision ~ps en IR



Photodétection de retour : Réponse non linéaire SPAD en mode GEIGER : très sensible (gain 10<sup>10</sup>) à 532 nm

Efficacité quantique ~15%

Temps de montée : qques centaines de ps ;

jitter ~20 ps en simple-photon

Φ = 100 μm ; T = -60 °C



Défaut : Time-Walk



## Two-color correction formula



From D. D. Wijaya et Al., Springer Verlag, 2011

ηΖU

Dispersion effect (term due to dry atmosphere) Curvature of optical paths Water vapor density effect

	In mm		In mm		In mm	
E (°)	$v(\mathcal{R}_1 - \mathcal{R}_2)$		$(\nu P_{21} - \kappa_1)$		$H_{21} \cdot SIWV$	r
3	$-36,782.5 \pm 1$	62.2	$-390.1 \pm 11.$	3	$30.8 \pm 10.4$	_
5	$-25,574.7 \pm 9$	9.8	$-143.2\pm3.6$		$19.8\pm6.8$	
10	$-14,069.6 \pm 4$	9.9	$-25.2 \pm 0.6$		$10.4\pm3.5$	
15	$-9,639.8 \pm 3$	3.4	$-8.2 \pm 0.2$		$7.0\pm2.4$	
20	$-7,351.9 \pm 2$	5.3	$-3.4\pm0.1$		$5.3\pm1.8$	
30	$-5,057.9 \pm 1$	7.3	$-1.0 \pm 0.0$		$3.6\pm1.2$	
40	$-3,942.3 \pm 1$	3.4			$2.8\pm1.0$	
60	$-2,930.1 \pm 1$	0.0	<-0.3		$2.1\pm0.7$	
90	$-2,538.7 \pm 8$	3.6			$1.8 \pm 0.6$	

# Improve the metrological performances of SLR station

Two-colors measurement + water vapor radiometer

77U

 $2D = R1 + \nu(R1 - R2) + (\nu P \downarrow 21 - \kappa \downarrow 1) + H \downarrow 21 SIWV$ 

*P*21 represents the propagation corrections from the ray path *p*2 to *p*1  $\kappa$ 1 is the arc-to-chord correction for the ray path *p*1 which accounts for the curvature effect *v* the power of dispersion *H*21 the water vapor factor SIWV the slant integrated water vapor

#### Millimeter accuracy possible with a significant precision improvement



From D. D. Wijaya et al., Springer Verlag, 2011

## Spatial geodesy

AZUN

PRODUITS	VLBI	SLR	GNSS	DORIS
Rotation de la Terre			-	
Longueur du jour	***	*	***	
Mouvement du pôle	***	**	***	*
Nutation	***		*	
UTI	***			
Repère terrestre				
Homogénéité de la couverture	*	*	**	***
Centre de masse (GM)		***	*	*
Centre de figure	**			
Mouvements tectoniques	***	**	***	***
Densification		*	***	**
Repère céleste	***			
Orbitographie des satellites artificiels				
Type : GPS/GLONASS		*	***	
Type : LAGEOS, ETALON		***		
Type : TOPEX/Poséïdon, JASON-1		**	***	***
Type : ERS, ENVISAT		**	***	***
Type : CHAMP, GRACE		*	***	
Champ de gravité				
Grandes longueurs d'onde (statique)		***	**	*
Courtes longueurs d'onde (statique)		**	***	**
Variations temporelles		**	*	

## La détection

Le défi :

Dater à la picoseconde 1 photon sur 10<sup>20</sup>

## **Optimisation par 3 filtrages :**

• **Spatial** : limitation du champ par un diaphragme de 7 arcsec devant le détecteur

 Spectral : filtre interférentiel devant le détecteur ne laisse passer que les photons à la longueur d'onde du laser ; largeur 2,4 å

 Temporel : le détecteur n'est sensibilisé que dans un laps de temps proche du retour théorique des photons (porte de +/- 50 ns)