





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



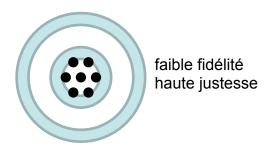
Performances métrologiques des instruments

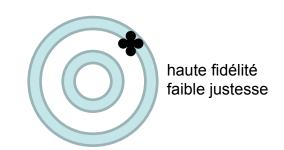
Termes communément utilisés : Exactitude & Précision

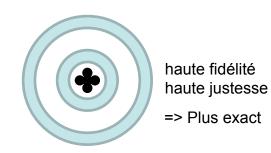
- Le terme français « précision » n'existe pas en métrologie
 - L'exactitude ne s'exprime pas numériquement

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.









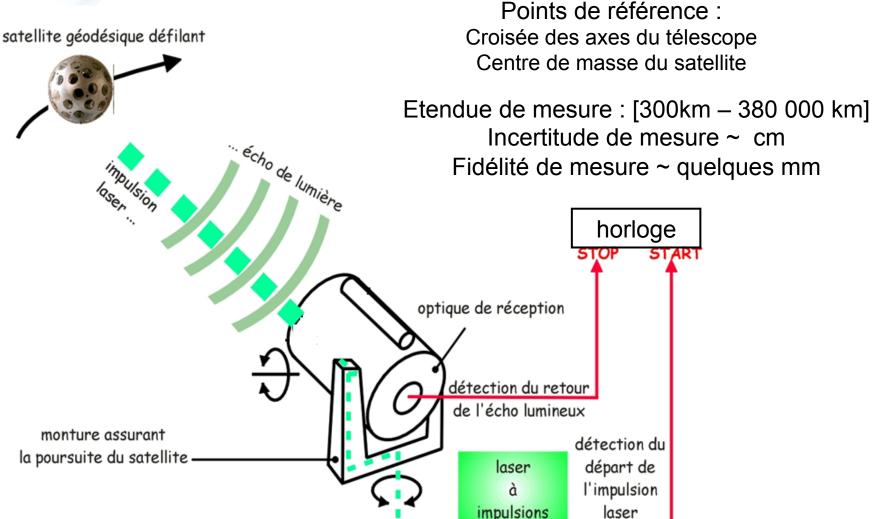
- 1. Principe de fonctionnement
- 2. Performances métrologiques des stations SLR
- 3. R&D pour atteindre une incertitude millimétrique



Principe de fonctionnement

Mesure du temps de vol d'impulsions laser

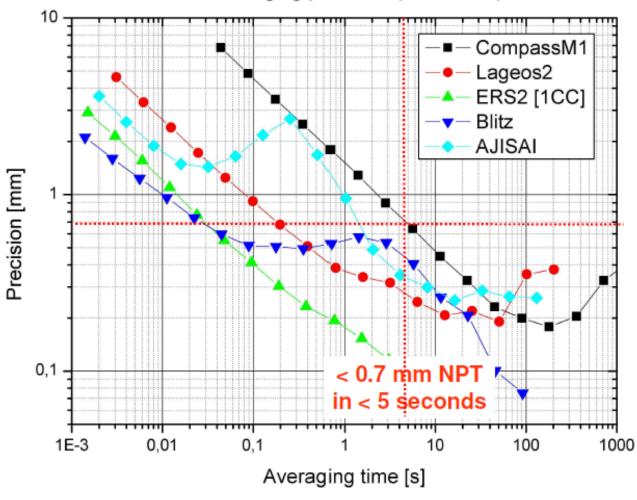
$$D = \frac{(t_{arriv\acute{e}e} - t_{d\acute{e}part}).c}{2}$$





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

SLR ranging precision (Graz 2011)





Sources d'erreurs

$$D = \frac{(t_{arriv\acute{e}e} - t_{d\acute{e}part}).c}{2}$$

~ mm

~ mm

Définition & stabilité des points de référence :

- Centre de masse des satellites
- Mouvement de la croisée des axes du télescope vis-à-vis de la topographie locale

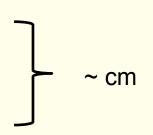
Sources d'erreurs mesurées et corrigées

La chaîne instrumentale :

- Les détecteurs
- Etalonnage de l'instrument

L'atmosphère:

- Variation de la vitesse de propagation
- Déviation du faisceau
- Déformation du front d'onde et speckles



Source d'erreur non mesurée

L'atmosphère

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

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

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

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

$\begin{array}{c} \lambda_1/\lambda_2 \\ (\mu m) \end{array}$	$\sigma_{\mathcal{R}_1}$ (µm)	$\sigma_{\mathcal{R}_2}$ (μ m)	σ_{v} (-)	σ_{κ_1} (mm)	$\frac{\sigma P_{21}}{(\mu m)}$	$\frac{\sigma_{H_{21}}}{(\text{m}^3\text{kg}^{-1})}$	$_{(\text{kg m}^{-2})}^{\sigma_{\text{SIWV}}}$
0.532/1.0684	47.16	45.03	6.61×10^{-4}	1	45.03	2.89×10^{-6}	7.4017
0.4235/0.847	76.60	71.15	3.80×10^{-4}	1	71.15	3.05×10^{-6}	7.5444

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



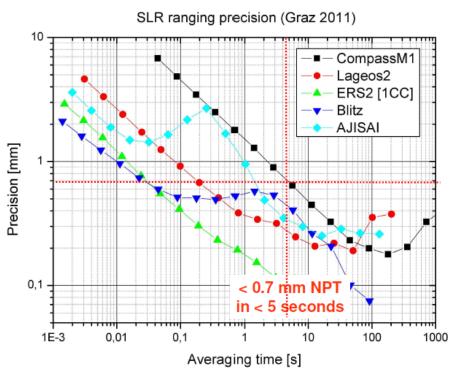
R&D pour atteindre une incertitude millimétrique

Precision of the Graz laser station (kHz repetition rate)

[I. Prochazka, 17th ILRS Workshop, 2011]

Pour obtenir une incertitude mm, nous devons:

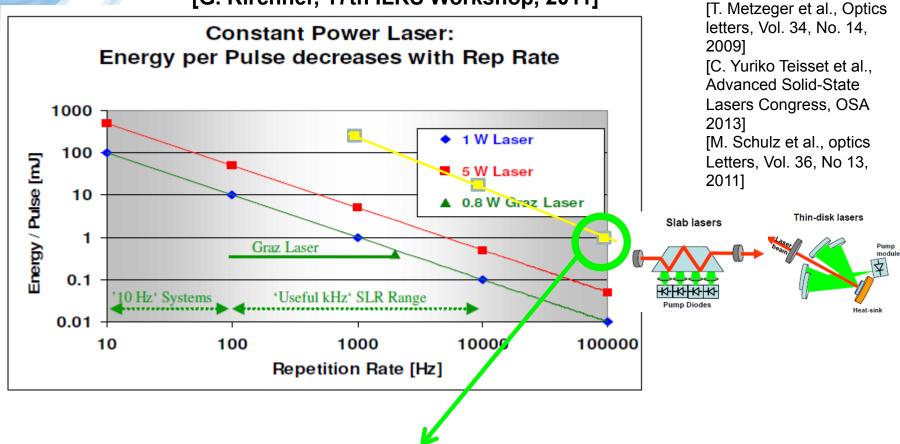
- Améliorer d'un facteur 10 la fidélité ce qui requiert d'augmenter la cadence le mesure d'un facto est blanc
- Etre capable d'atteindre ces performances pour deux longueurs d'ondes





R&D pour atteindre une incertitude millimétrique





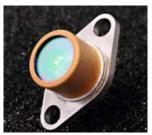
1 mJ/impulsion laser @ 100 kHz de taux de répétition Possible maintenant !!



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^e 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 $(75 \mu m)$ @ 8s Pour une cadence laser de 10 kHz

Travaux en 2015 : Télémétrie LLR en IR

Second détecteur infrarouge testé en conditions réelles

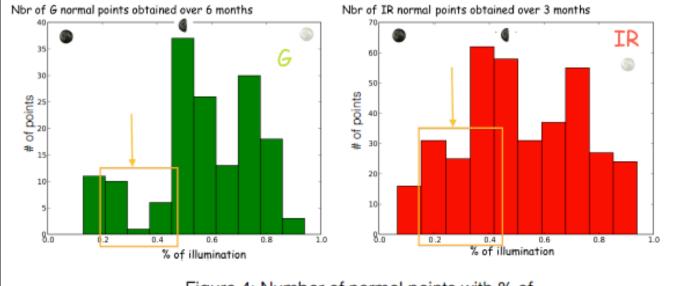


Figure 4: Number of normal points with % of illuminated Moon (as seen from Earth)

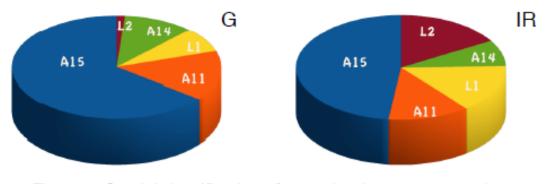


Figure 5: Spatial densification of normal points over 6 months

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)

GÓO AZUr

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

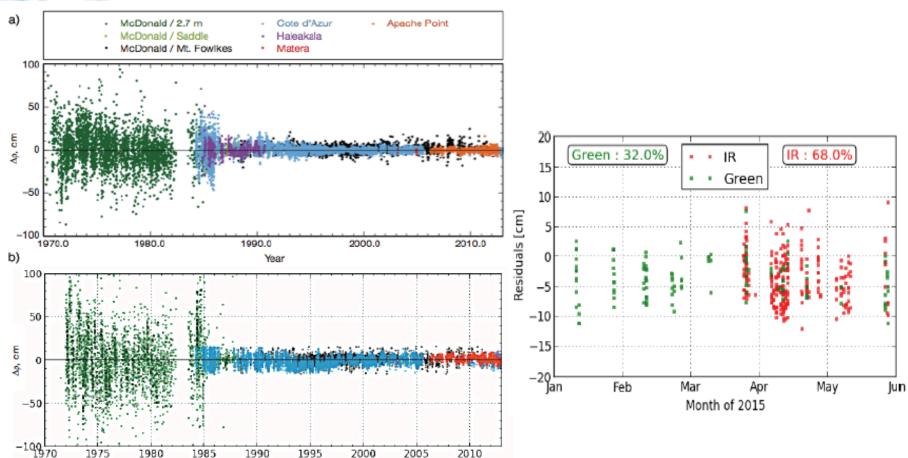
 Méthode : Validation du code par comparaison avec simulation INPOP/OP (H. Manche) => ok à 0.1 mm

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

Year



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



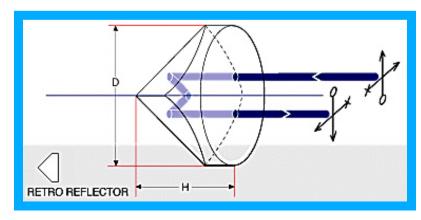
Stella Ø=24cm, 60CCR, 48kg



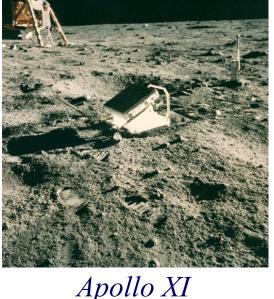
GPS 239x194x37mm (32CCR)



Rétro-réflecteur laser



Rétroreflecteur laser (CCR)



Apollo XI 46x46cm², 100CCR



ERS-1 Ø=20cm, 9CCR

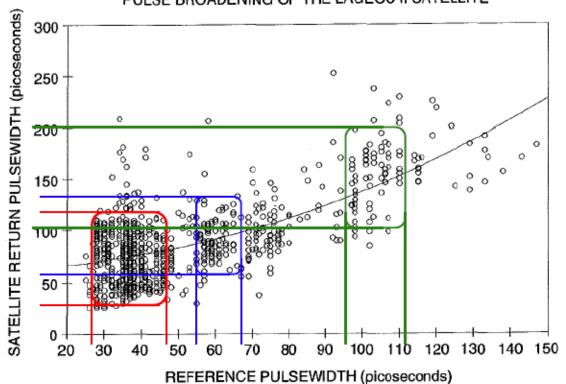




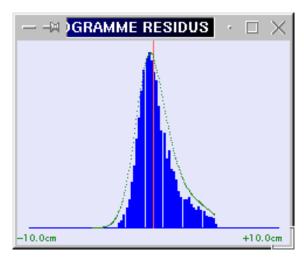
Signature des satellites

Lageos 2 – Pulsed Measurement- Temporal Broadening

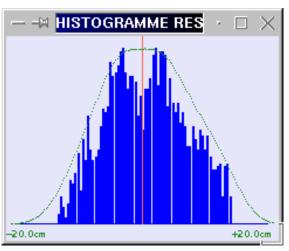




4 different pulse widths → 30, 37, 60, 105ps
Broadening of the pulse width (FWHM) by as much as 100ps



LAGEOS



GLONASS



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



Signature des satellites

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



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



Photodétection de retour : Réponse non linéaire

SPAD en mode GEIGER : très sensible (gain 10¹⁰) à 532 nm

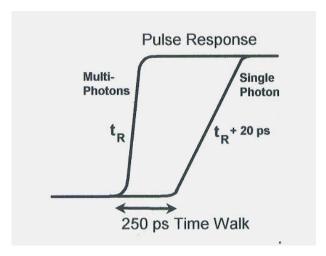
Efficacité quantique ~15%

Temps de montée : qques centaines de ps ;

jitter ~20 ps en simple-photon

 $\Phi = 100 \ \mu m \; ; T = -60 \ ^{\circ}C$





Tension appliquée

état d'équilibre métastable

Breakdown (seuil de rupture)

évènement lumineux

Bons ou mauvais photons, bruit thermique

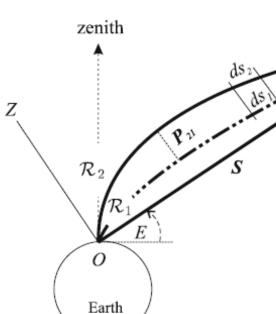
Départ en avalanche

Solution:

Travailler en régime de simple-photon



Two-color correction formula



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

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

	In mm	In mm	In mm
<i>E</i> (°)	$\nu(\mathcal{R}_1 - \mathcal{R}_2)$	$(\nu P_{21} - \kappa_1)$	$H_{21} \cdot SIWV$
3	$-36,782.5 \pm 162.2$	-390.1 ± 11.3	30.8 ± 10.4
5	$-25,574.7 \pm 99.8$	-143.2 ± 3.6	19.8 ± 6.8
10	$-14,069.6 \pm 49.9$	-25.2 ± 0.6	10.4 ± 3.5
15	$-9,639.8 \pm 33.4$	-8.2 ± 0.2	7.0 ± 2.4
20	$-7,351.9 \pm 25.3$	-3.4 ± 0.1	5.3 ± 1.8
30	$-5,057.9 \pm 17.3$	-1.0 ± 0.0	3.6 ± 1.2
40	$-3,942.3 \pm 13.4$		2.8 ± 1.0
60	$-2,930.1 \pm 10.0$	<-0.3	2.1 ± 0.7
90	$-2,538.7 \pm 8.6$		1.8 ± 0.6

Improve the metrological performances of SLR station

Two-colors measurement + water vapor radiometer

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

P21 represents the propagation corrections from the ray path p2 to p1 $\kappa1$ is the arc-to-chord correction for the ray path p1 which accounts for the curvature effect v the power of dispersion H21 the water vapor factor SIWV the slant integrated water vapor

Millimeter accuracy possible with a significant precision improvement

Precision to reach at each wavelength

$\begin{array}{c} \lambda_1/\lambda_2 \\ (\mu m) \end{array}$	σ _{R1} (μm)	$\sigma_{\mathcal{R}_2}$ (μ m)	σ_{v} (-)	$\frac{\sigma_{\kappa_1}}{(mm)}$	σP_{21} (µm)	$\frac{\sigma_{H_{21}}}{(m^3kg^{-1})}$	$\frac{\sigma_{\rm SIWV}}{({\rm kg~m}^{-2})}$
0.532/1.0684	47.16	45.03	6.61×10^{-4}	1	45.03	2.89×10^{-6}	7.4017
0.4235/0.847	76.60	71.15	3.80×10^{-4}	1	71.15	3.05×10^{-6}	7.5444

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



Spatial geodesy

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 10²⁰

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)