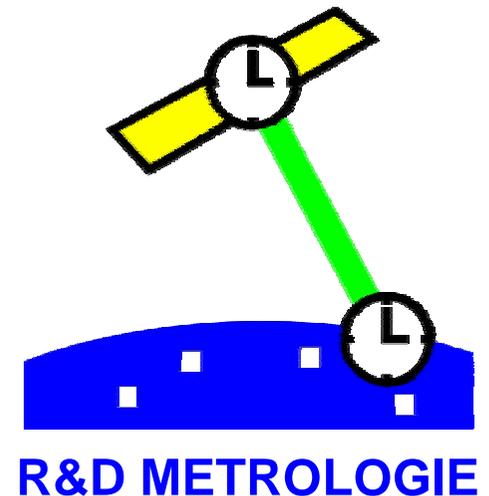


Télémétrie Laser

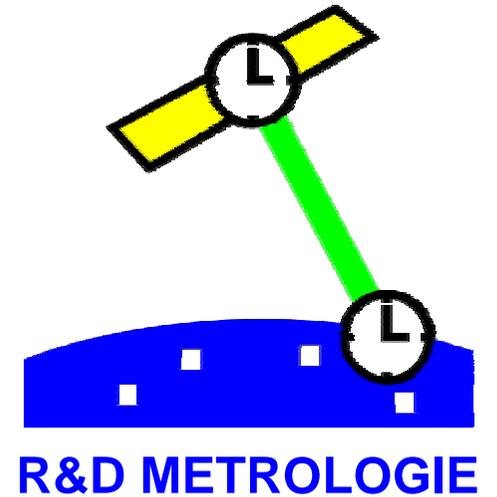
- Télémétrie Laser 2 voies
- Transfert de temps par Lien Laser T2L2
- Télémétrie Laser Interplanétaire

*Etienne Samain,
OCA, Gémini, 2130 route de l'observatoire,
06460 Caussols,
France*



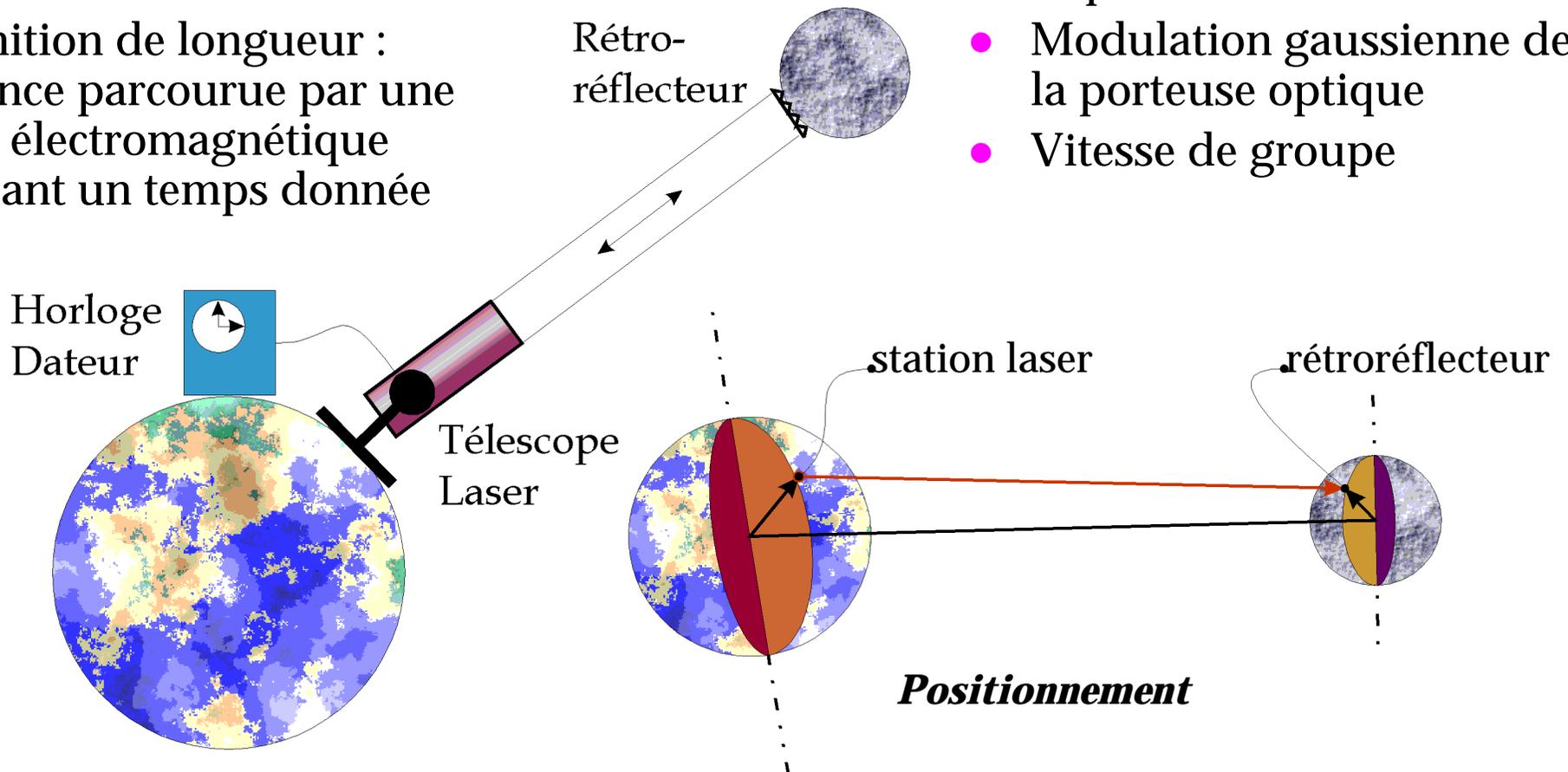
Télémétrie Laser

2 voies



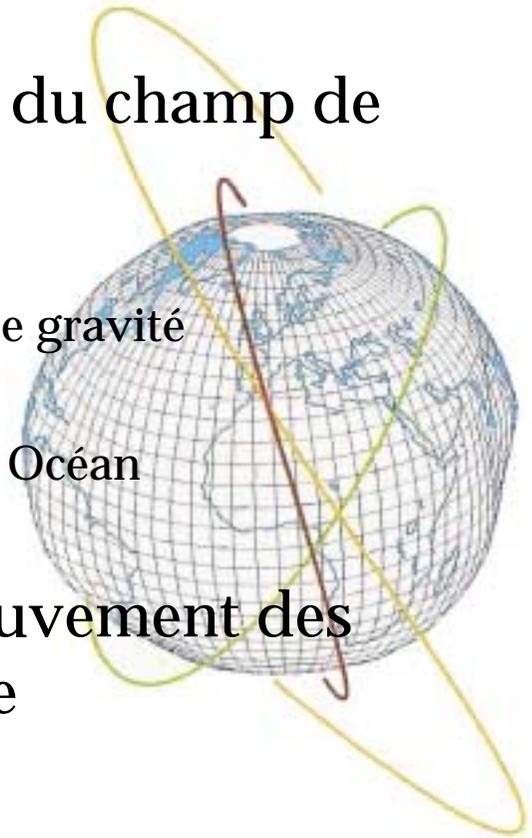
Principe de la télémétrie laser

- Définition du temps :
Atome
- Définition de longueur :
distance parcourue par une onde électromagnétique pendant un temps donnée
- Propagation d'une impulsion
- Modulation gaussienne de la porteuse optique
- Vitesse de groupe



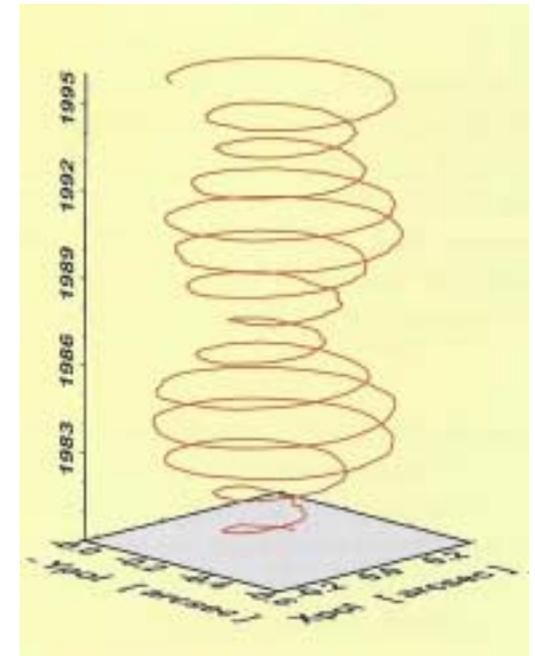
Objectifs scientifiques

- Mesure des grandes longueurs d'onde du champ de gravité terrestre
 - » Détermination précise et exacte des orbites
 - » Etude des variations dans le temps du champ de gravité
 - Circulation atmosphérique
 - Echange de masse Glaciers – Atmosphère – Océan
 - Etude du rebond post-glacier
- Détermination de la position et du mouvement des stations laser par rapport au géo-centre
 - » Référence pour l'étude du niveau des océans
 - » Référence pour l'étude du rebond post-glacier



Objectifs scientifiques

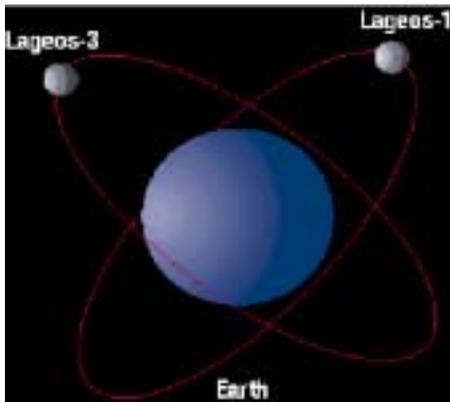
- Variation de la rotation de la terre
 - » Détermination de solution rapide du temps UT0
 - » Etude de l'échange de moment angulaire
Atmosphère – Océan – Glacier – Terre solide
 - » Etude de la dissipation d'énergie liée aux marées
- Etude de la tectonique des plaques
 - » Exactitude : mm/an
- Étalonnage altimètre pour la mesure du niveau des mers
 - » Séparation de la dérive des instruments / dérive long terme du niveau des mers



Objectifs scientifiques

- Physique fondamentale

- » Vérification du principe d'équivalence à $2 \cdot 10^{-13}$
- » Invariance dans le temps de la constante de gravité G : vérifié à $8 \cdot 10^{-12}/\text{an}$
- » Paramètres post Newtonien
 $\beta - 1 = -0.001 \pm 0.004$ $\gamma - 1 = 0.002 \pm 0.004$

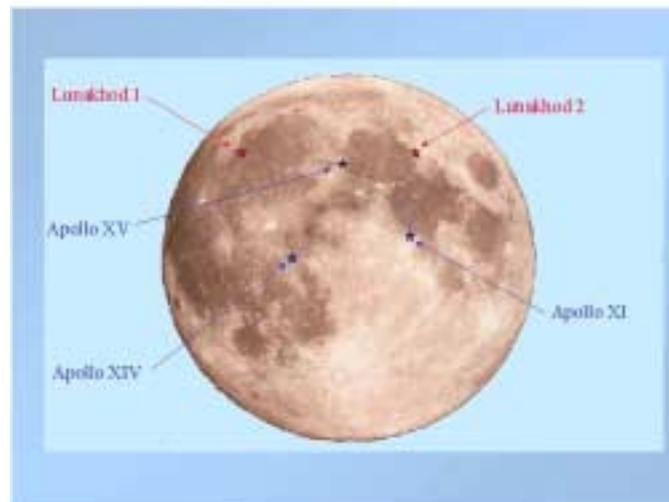
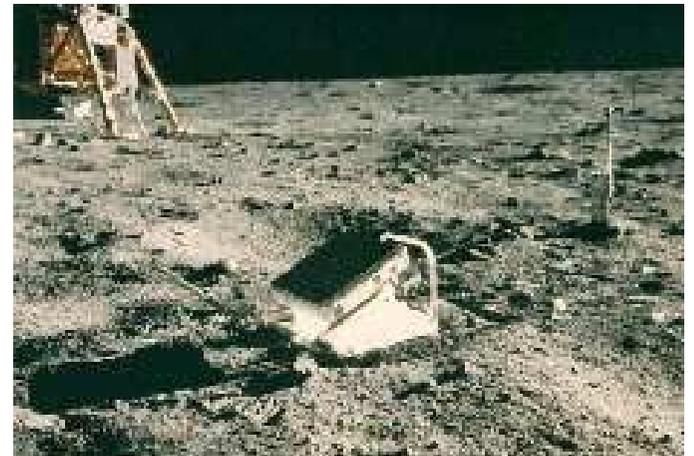


- » Mesure exacte du produit GM
- » Mesure de l'effet Lenses-Thirring (entraînement du référentiel lié à la rotation de la terre)

Objectifs scientifiques

- Sélénophysique

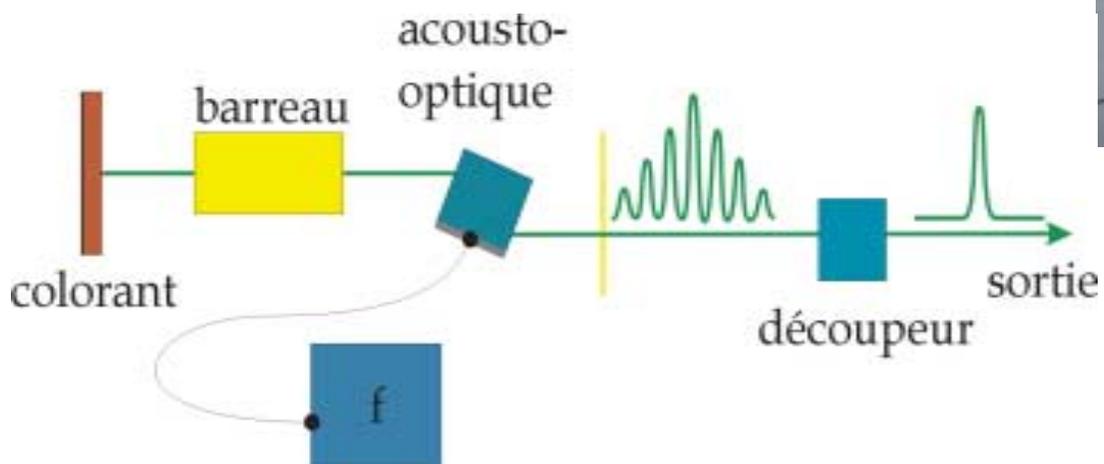
- » Structure interne de la Lune
- » Analyse des librations lunaires (J_2 solaire)
- » Mesure de l'éloignement de la lune (3.8 cm/an)



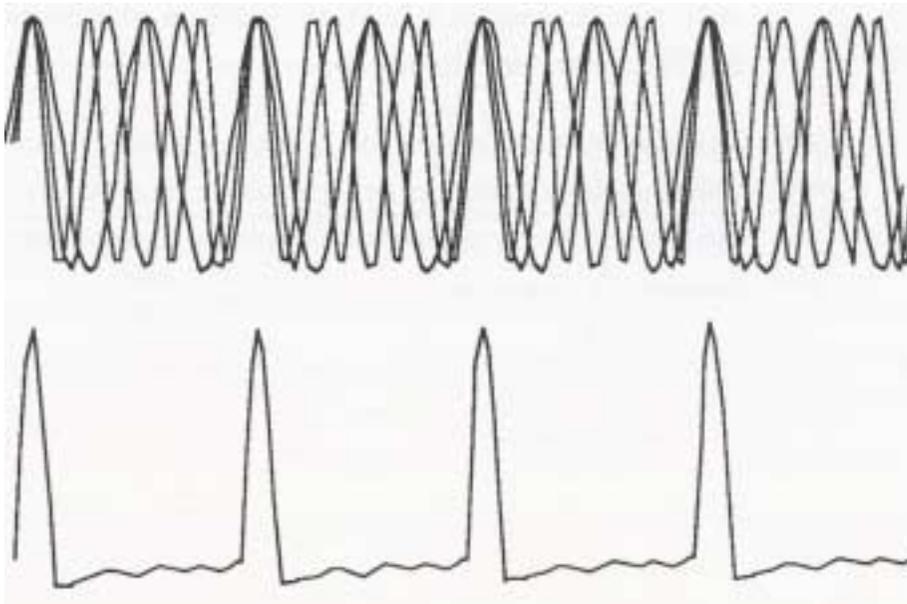
Les différents réflecteurs déposés entre 1969 et 1972

Laser

- Laser Néodyme YAG
 - $\lambda = 1064 \text{ nm}$ et $\lambda = 532 \text{ nm}$
 - FWHM : 20 ps
- Pompage par flash
- Blocage de mode passif – actif



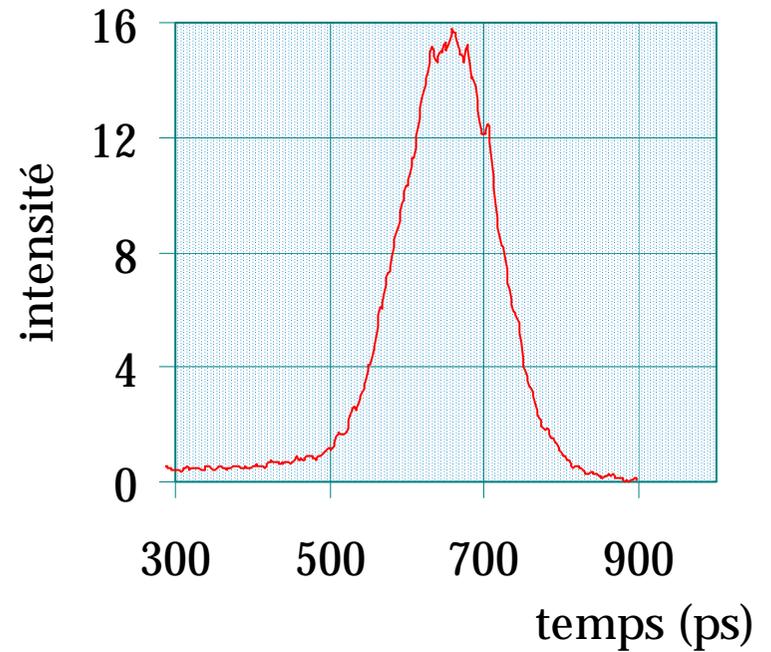
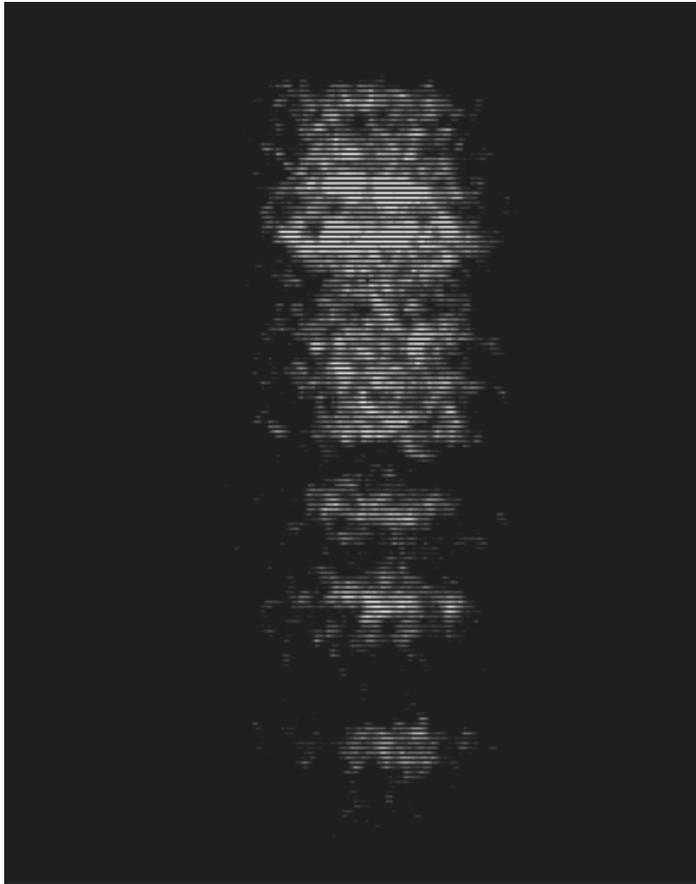
Blocage de mode



Laser

- Laser Titane Saphir 843 nm + 426 nm doublé
 - Pompage par laser Yag
 - ➔ Doublet intéressant pour le 2 couleurs
- Laser haute cadence pompage diode (~ 2 kHz)
 - Oscillateur 100 MHz continu
 - Cavité régénérative
 - ➔ Puissance moyenne élevée
 - Grande fiabilité

Mesure de la largeur des impulsions laser



Distribution temporelle

Photo-détection

- Photo-diode à avalanche en mode Geiger
- Rendement @ 532 nm : 0.2
- Précision : 25 ps en simple photon
- Diamètre : 200 μm
- Bruit : 5 μS



Photo-diode à avalanche en mode Geiger

On applique aux bornes de la diode une tension supérieure à la tension de breakdown en avance sur l'arrivée des photons



Avalanche déclenchée par des photons

Tension appliquée

Signal lumineux

Avalanche



SPAD K14 100 μm Précision – Simple photon

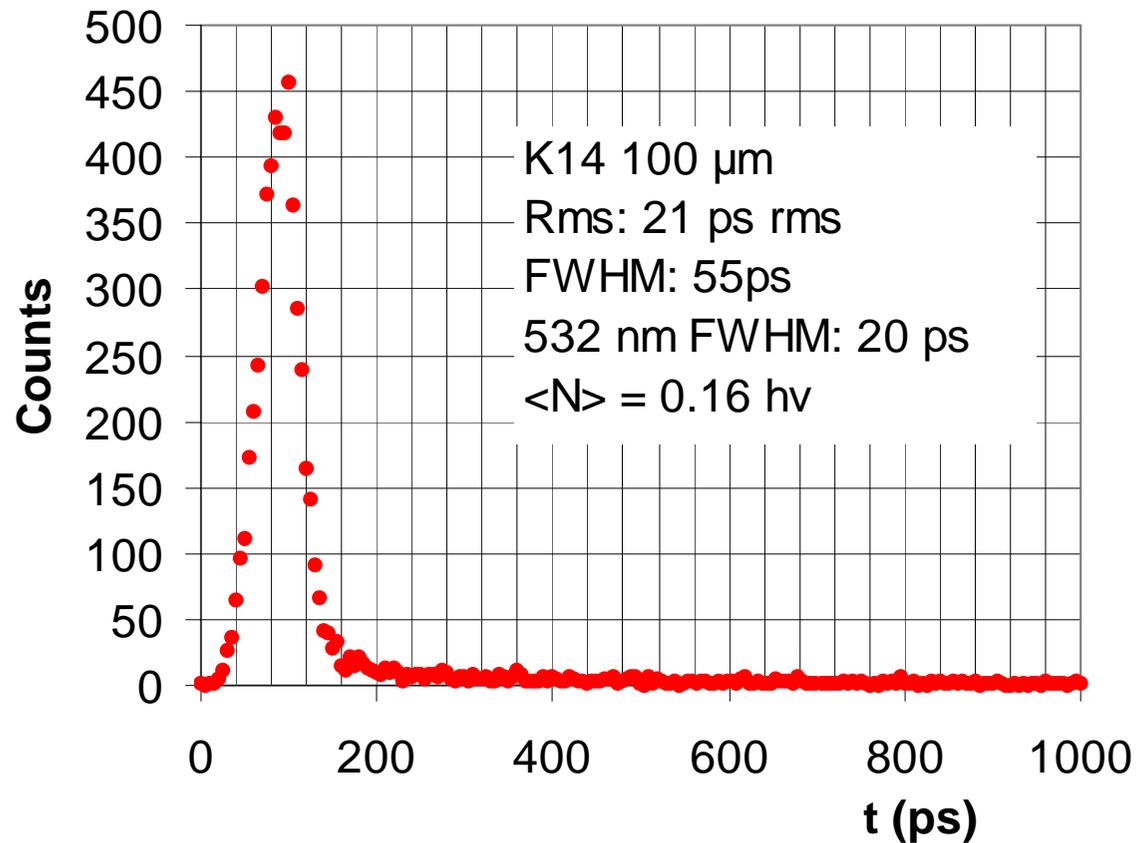
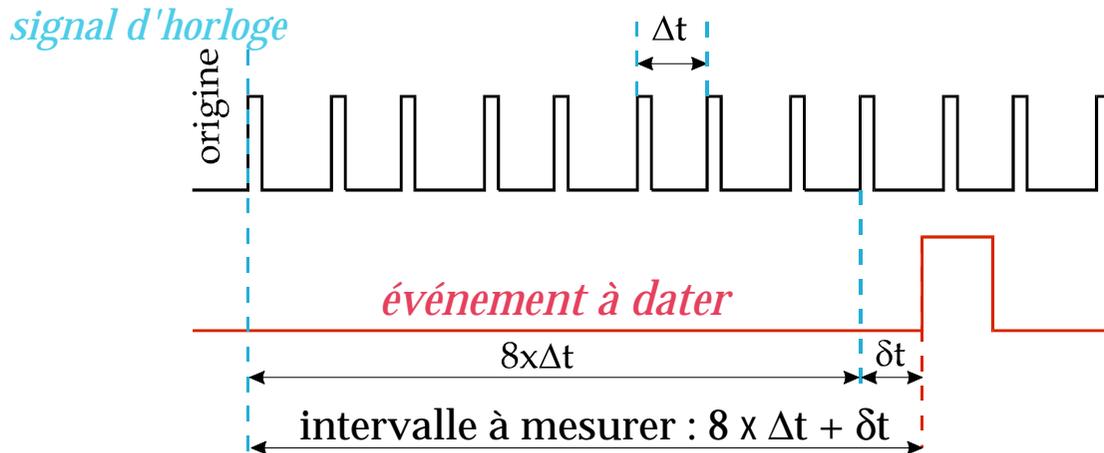
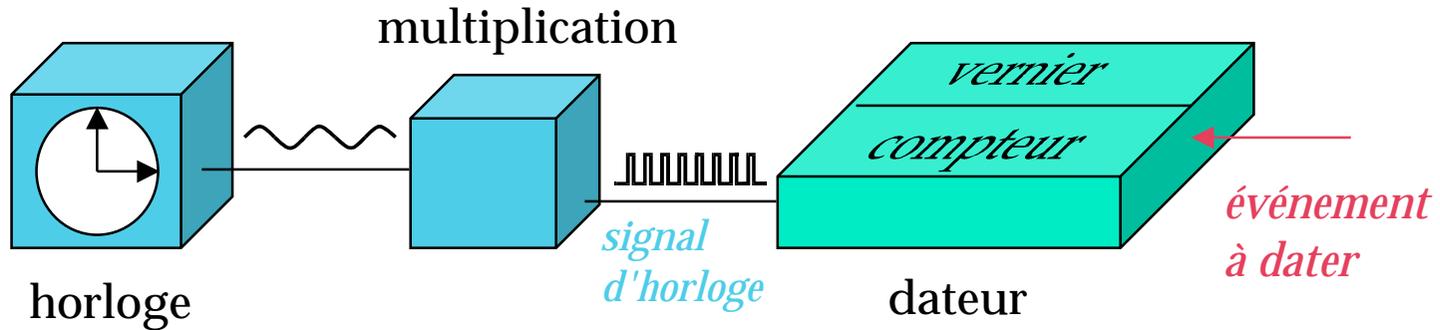


Photo détection

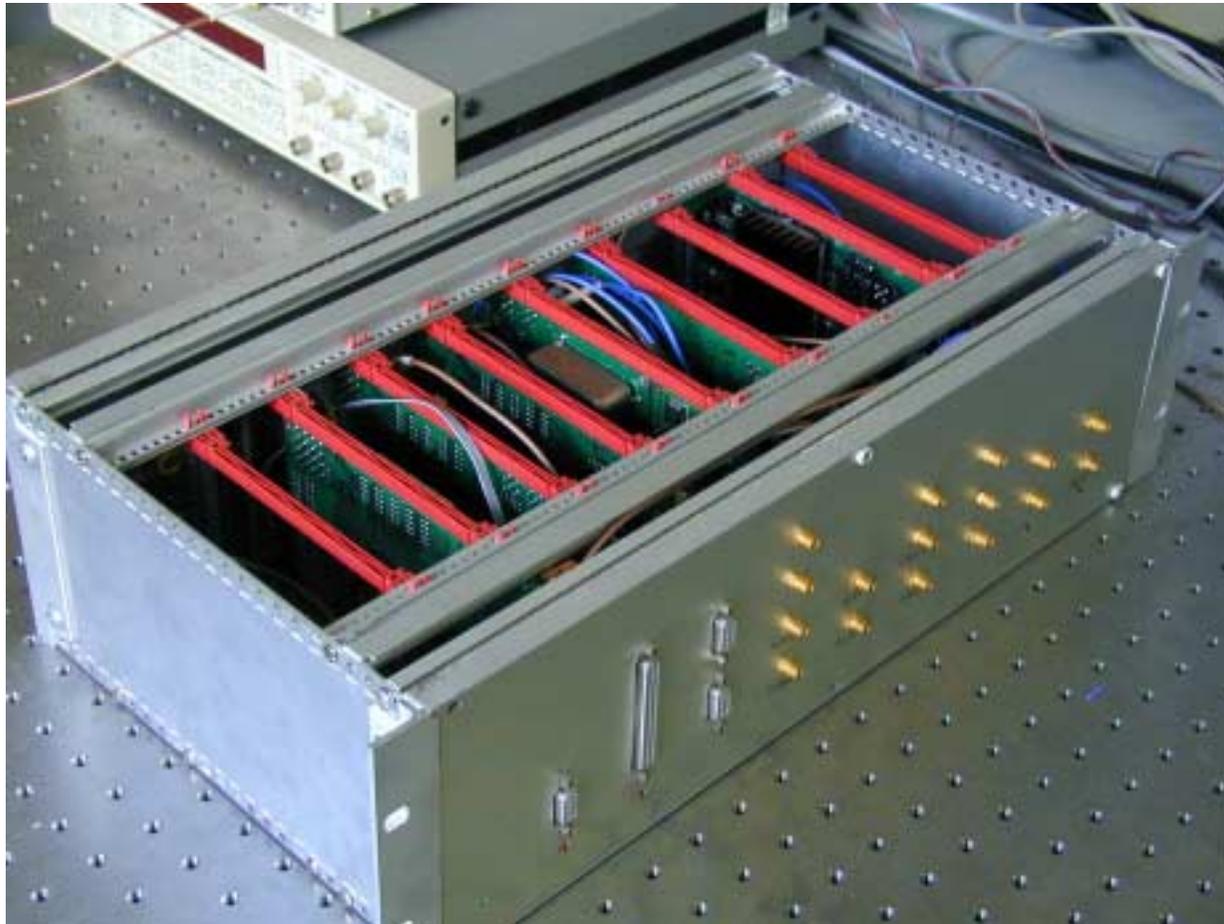
- Photo multiplicateur
 - + Discrimination du bruit
 - + Mesure du nombre de photon
 - + Grande surface
 - Mauvaise précision (~ 1 ns)

- Galette de micro canaux MCP
 - + Discrimination du bruit
 - + Mesure du nombre de photon
 - + Grande surface
 - + Bonne précision (~ 25 ps)
 - Fragile

La chronométrie

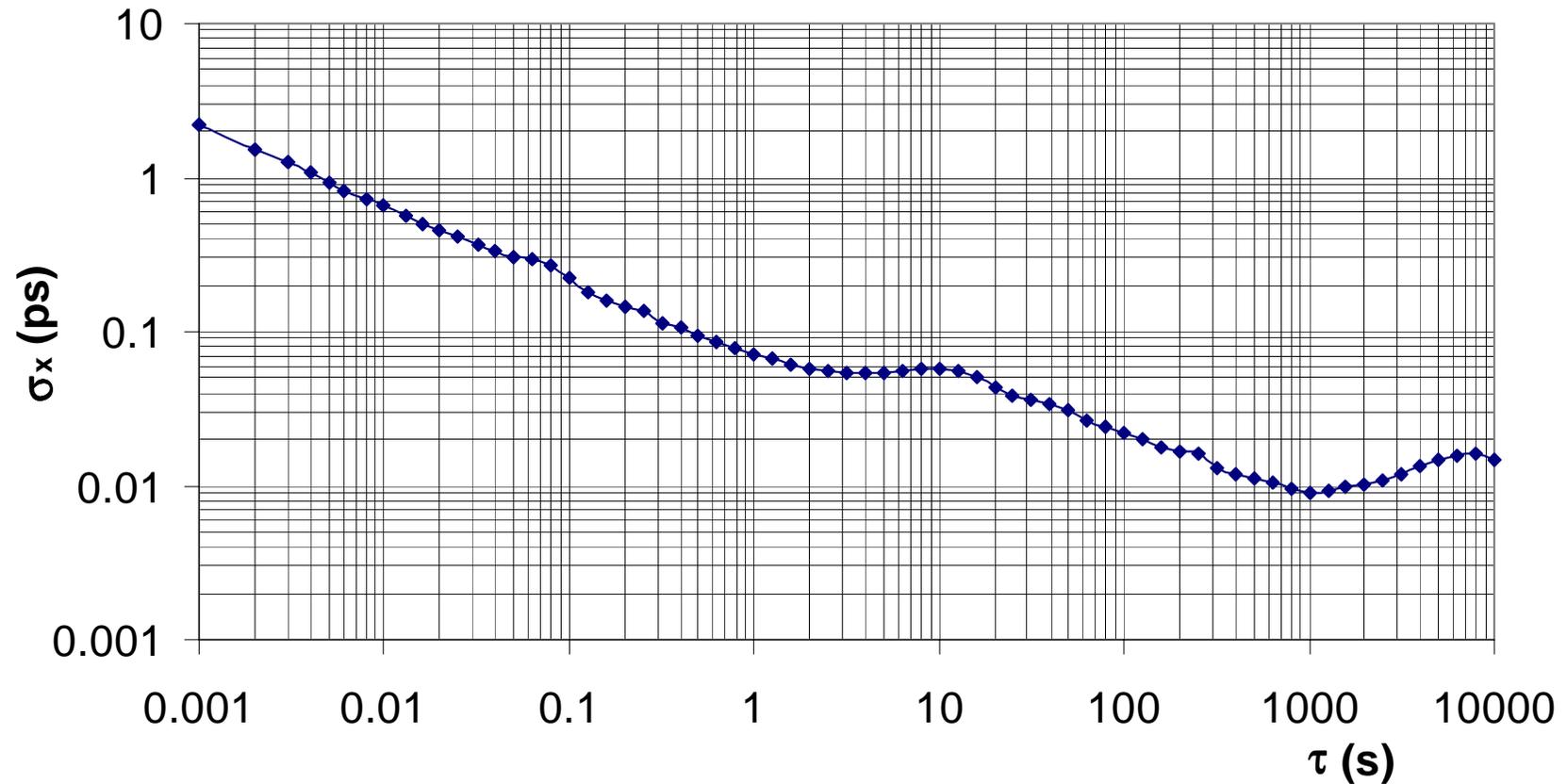


Dateur OCA Prototype



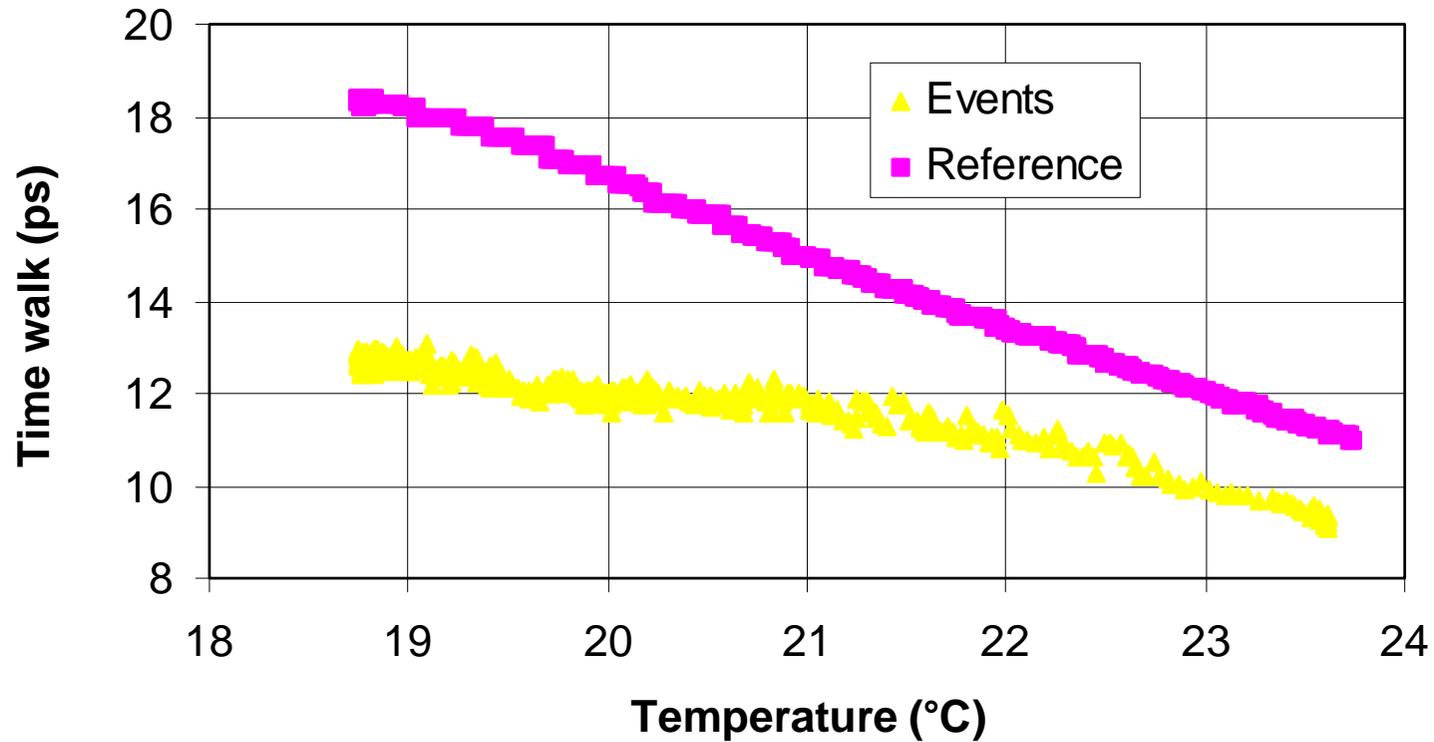
Performances Dateur OCA

Stabilité en racine de TVAR



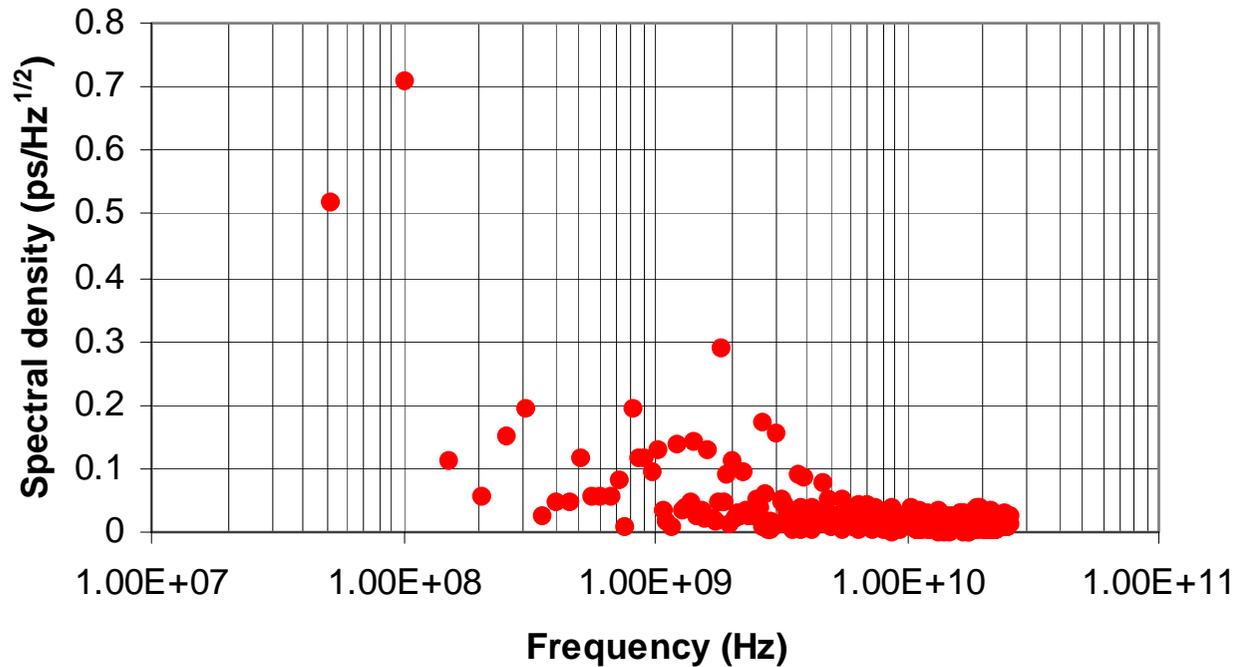
Performances Dateur OCA

Sensibilité thermique



Performances Dateur OCA

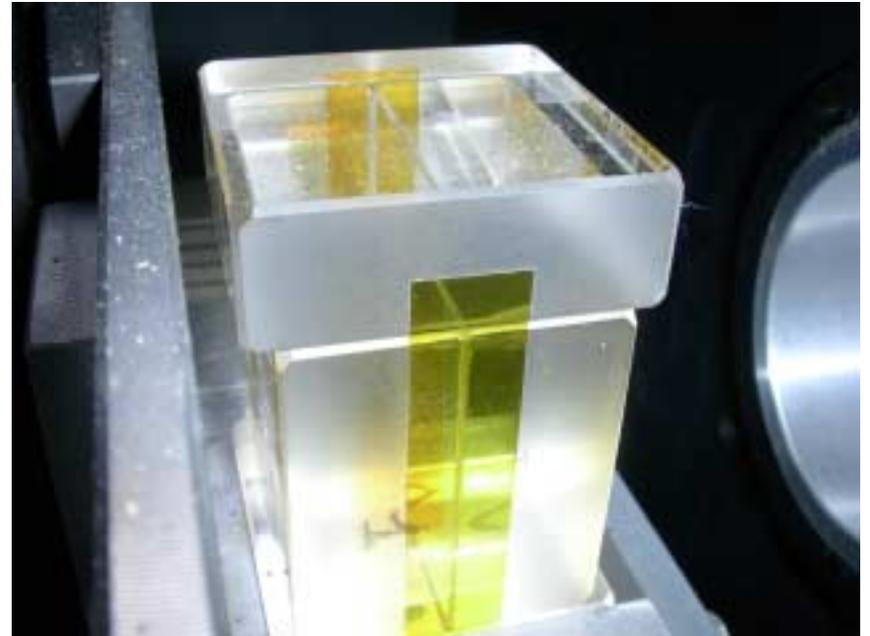
Erreur de linéarité



➔ Linéarité : 1 ps rms, +/- 1.5 ps

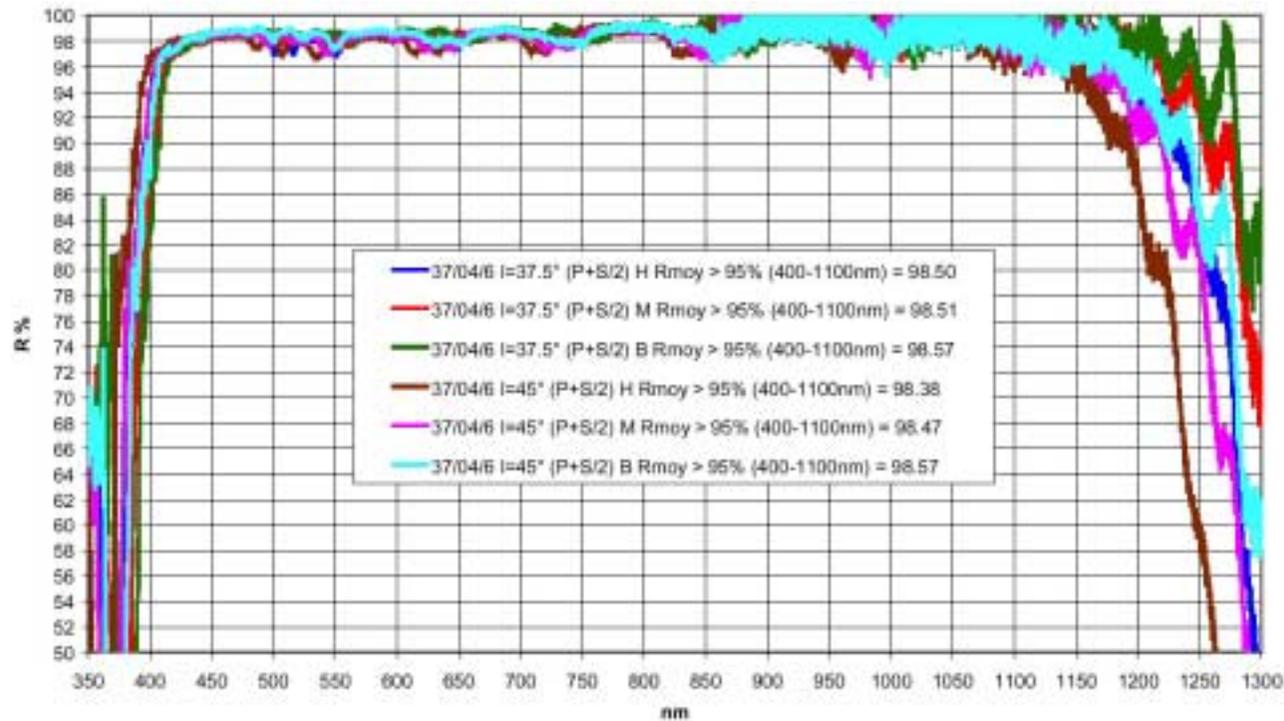
Filtrage

- Filtrage spectral
 - » Filtre interférentiel
 - » $\delta\lambda = 0.12 \text{ nm}$
- Filtrage spatial
 - » 5 arcsec : turbulence atmosphérique
 - » ~ 10 km sur la Lune
- Filtrage temporel
 - » Émulation d'une cible immobile
 - » Filtrage à 3σ

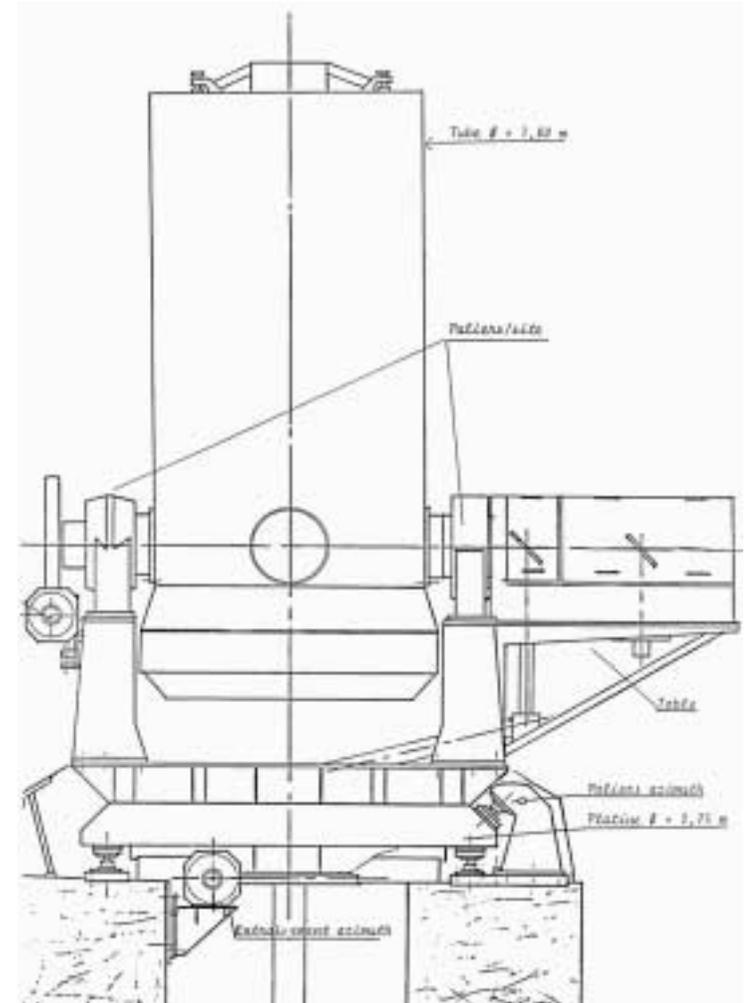


Optiques

- Traitement diélectrique
 - » Large bande 400 – 1100 nm
 - » Haute énergie : 10 J/cm² @ 3 ns

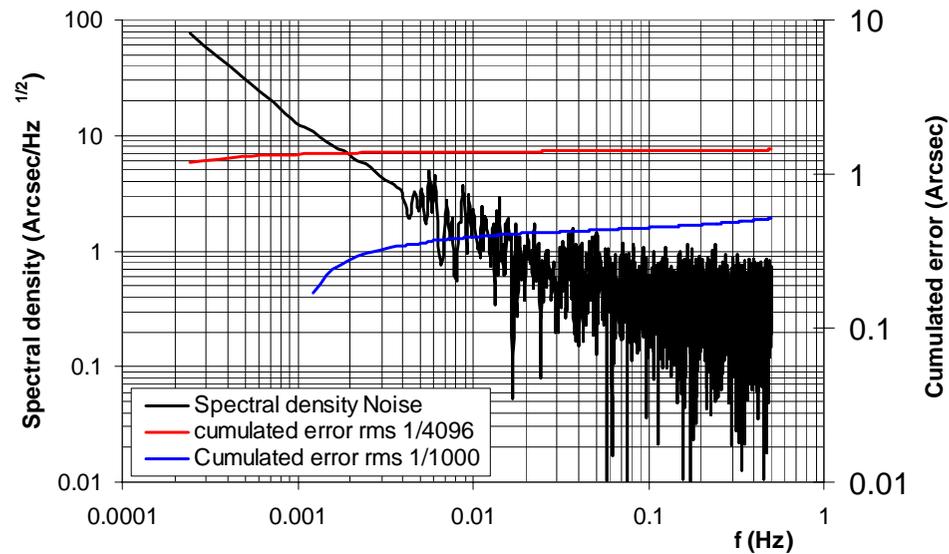


Télescope MéO (LLR)



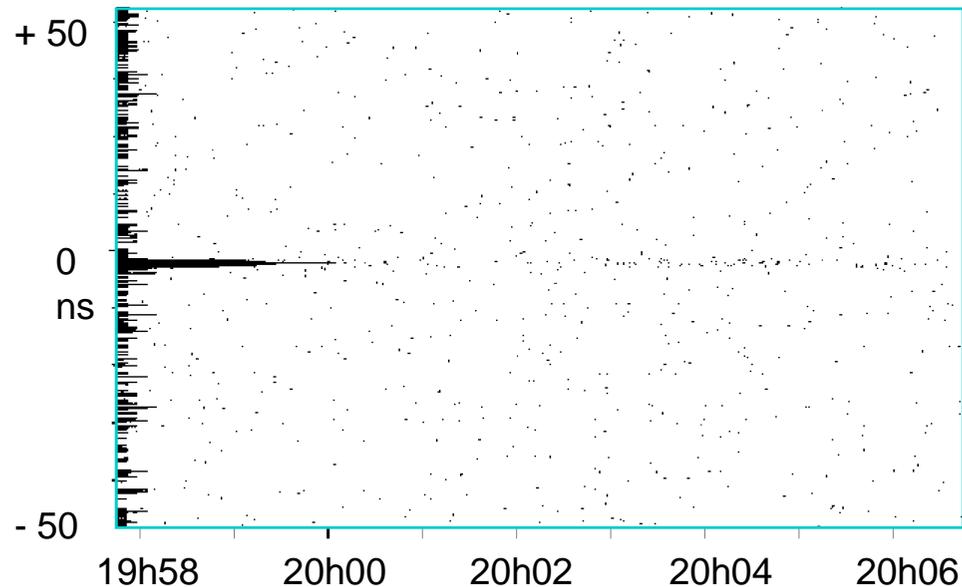
Télescope

- Bruit du pointé



- Vitesse pour la poursuite des satellites bas : $5^\circ/\text{s}$

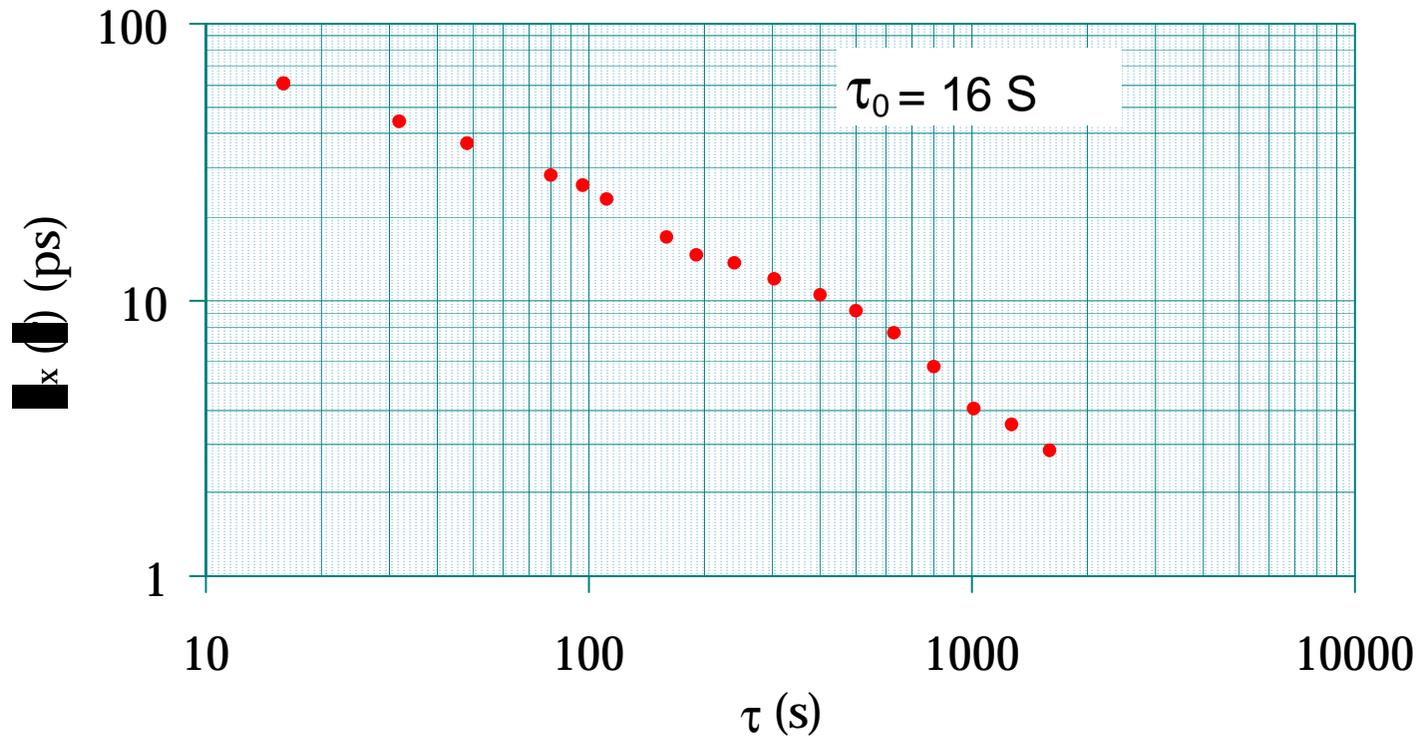
Série d'observation



Série de tirs de 10 minutes + moyennage

➔ **point normal** = temps de trajet aller-retour télescope-réfecteur à un instant donné

Stabilité MéO sur cible proche



Atmosphère

- L'atmosphère induit :
 - » Une variation de la vitesse de propagation
 - » Une déviation du faisceau
- La correction est :

$$C = \int_{Station}^{Cible} (n(s) - 1) ds$$

- n est une fonction de
 - » Longueur d'onde λ , pression Atmosphérique et de vapeur d'eau P_a et P_v et température T
 - » P_a , P_v , T sont fonction de s
- Principe de correction :
 - » On mesure T_0 , P_{A0} et P_{V0} au pied de la station laser
 - » On applique un modèle de correction
 - Modèle d'indice
 - Modèle de profil

Modèle d'indice de réfraction de l'air

Marini Murray

$$n = \frac{N_g}{10^6} + 1$$

$$N_g = 80,343 \cdot f(\lambda) \cdot \frac{P_A}{T} - 11,3 \cdot \frac{P_V}{T}$$

$$f(\lambda) = 0.965 + \frac{0.0164}{\lambda^2} + \frac{0.000228}{\lambda^4}$$

Correction en distance ΔR

Marini Murray

$$\Delta R = \frac{f(\lambda)}{1 - 0.0026 \cos(2\Phi) - 0.00031 H} \frac{A + B}{\sin(E) + \frac{\frac{B}{A+B}}{\sin(E) + 0.01}}$$

$$A = 0.002357 P_{A0} + 0.000141 P_{V0}$$

$$B = 1.08410^{-8} P_{A0} \cdot T_0 \cdot K + 4.73410^{-8} \frac{P_{A0}^2}{T_0} \frac{2}{3 - \frac{1}{K}}$$

$$K = 1.163 - 0.00968 \cos(2\Phi) - 0.00104 T_0 + 0.00001435 P_{A0}$$

Φ : Latitude de la station

H : Altitude de la station

E : Élévation de la cible

Comparaison Modèle – Ray Tracing

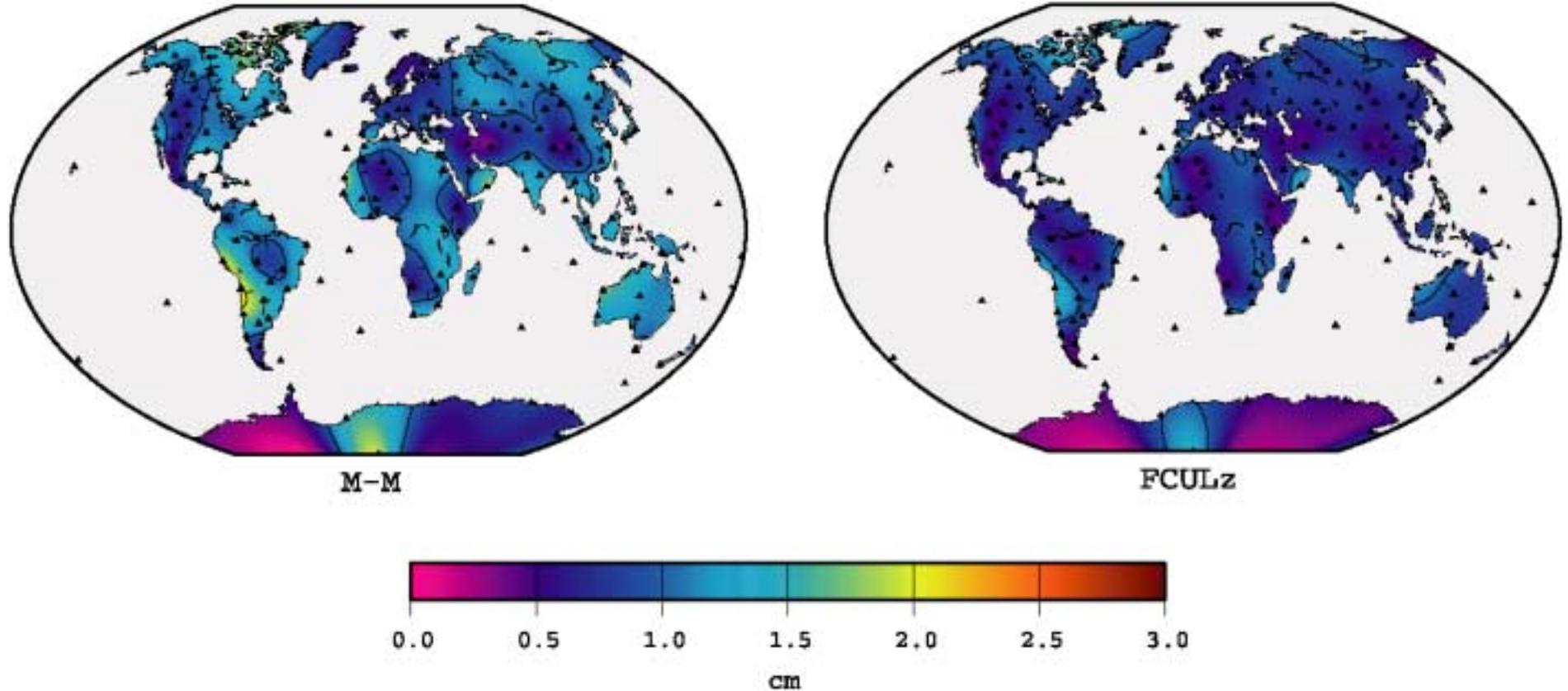
- Ray Tracing
 - » Mesure Ballon des profils réels de P_A , P_V et T en fonction de $H \sim 0 - 35$ km
 - » Calcul de l'indice de réfraction en fonction de H
 - » Calcul du délai zénithal
- Délai Zénithal Modèle – Ray Tracing [Mendes et al. 2004]

λ (mm)	Model	Mean (mm)	Rms (mm)
0.532	Marini-Murray	1.0	1.2
	Mendes	0.1	0.6
1.064	Marini-Murray	1.0	1.1
	Mendes	0.1	0.6

Erreur Rms des modèles

Marini Murray & Mendes - Elévation = 10°

[Mendes et al. 2002]



Télémétrie 2 couleurs

- Objectif : Évaluer les paramètres atmosphériques par mesure du délai entre 2 impulsions de longueurs d'onde différente

$$D = c \cdot \tau_1 - A \cdot c \cdot (\tau_2 - \tau_1) \qquad A = \frac{n_1 - 1}{n_2 - n_1}$$

n_1 et n_2 indices de réfraction aux 2 longueurs d'onde

τ_1 et τ_1 temps de propagation des 2 longueurs d'onde

- Incertitude en distance induite par δn
 - » Télémétrie classique : $\delta D \approx c \cdot \tau \cdot \delta n$
 - » Télémétrie 2 couleurs : $\delta D \approx c \cdot A \cdot (\tau_2 - \tau_1) \cdot \delta n \approx c \cdot \tau \cdot (n_2 - n_1) \cdot (n_1 - 1) \cdot \delta n$

τ : temps de propagation équivalent dans l'atmosphère $\sim 60 \mu\text{s}$

Télémétrie 2 couleurs

- Incertitude en distance induite par la chronométrie

$$\delta D \approx c \sqrt{\delta \tau^2 + A^2 \delta \tau_{\text{diff}}^2}$$

$\delta \tau$: Incertitude de la chronométrie classique

$\delta \tau_{\text{diff}}$: Incertitude de la chronométrie différentielle

- Titane Saphir : $\lambda_1 = 423 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 846 \text{ nm}$

$(n_2 - n_1) \cdot (n_1 - 1) \approx 10^{-8} \Rightarrow$ Incertitude δn est négligeable

$A \approx 12 \Rightarrow \delta \tau_{\text{diff}}$ doit être à l'échelle de la ps pour une exactitude de quelques mm

- Mesure de τ_{diff} par caméra à balayage de fente

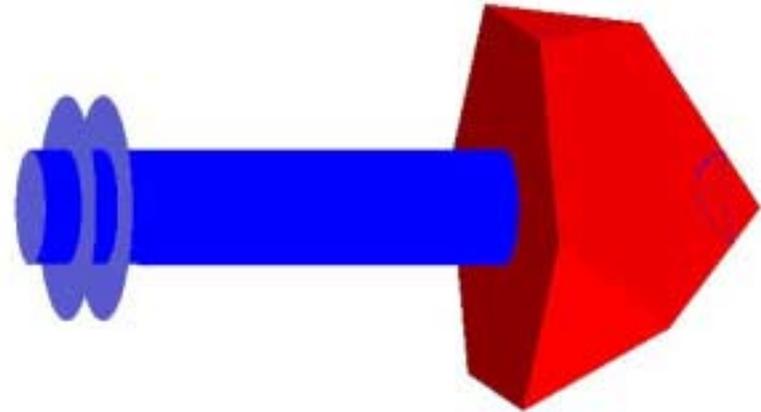
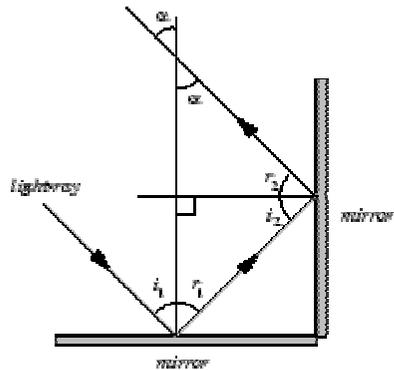
Cibles laser

- Propriété : Réfléchir une onde lumineuse suivant la direction incidente
- Caractéristiques
 - » La surface
 - » La réflectivité des surfaces
 - » Les tolérances géométriques
 - » La signature temporelle
 - » Le champ de vue
- Section efficace

$$\sigma = \rho \cdot S \frac{4\pi}{\Omega}$$

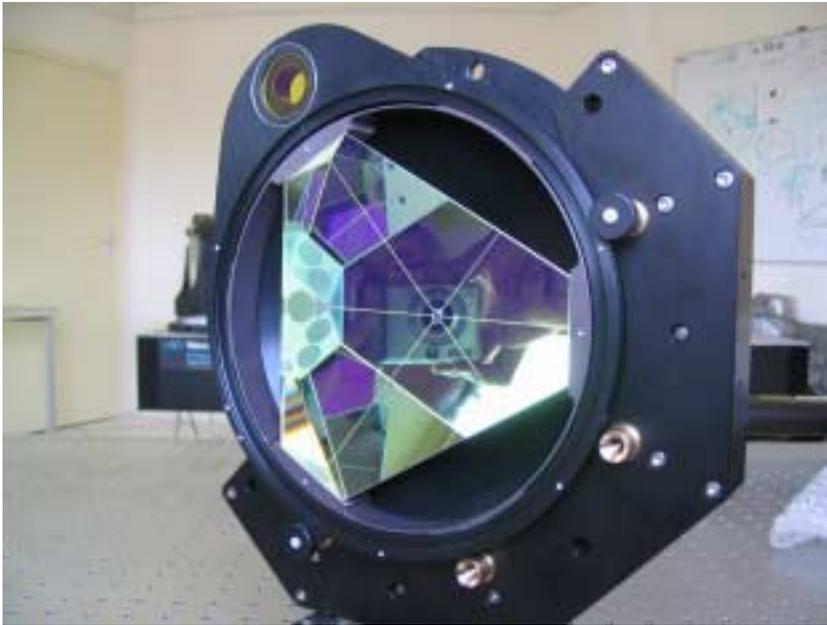
Coin de cube

- 3 faces perpendiculaires entre elles



- Plein ou creux
 - » Plein pour les petits coins de cube : champ de vue important, grande stabilité mécanique
 - » Creux pour les grands coins de cube : faible masse, pas de dégradation optique causée par les gradients thermiques

Quelques cibles



Mono coin de cube grand
champ T2L2

Diamètre 130 mm

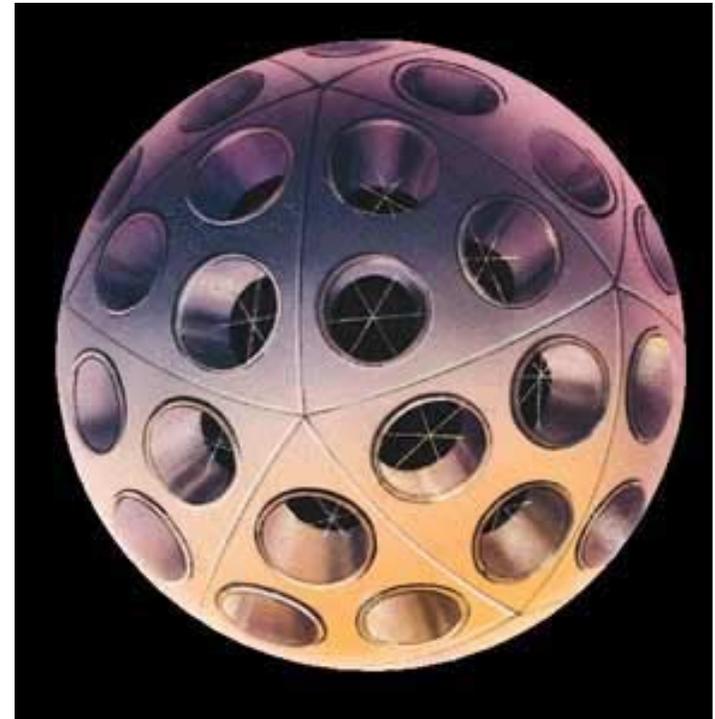


Rétro-réfecteur
GPS

Quelques cibles



Appolo 14 : 100 rétro réflecteurs de 38 mm sur un plan



Stella : 60 rétro réflecteurs de 32 mm sur une sphère de 240 mm

Bilan d'erreur

- Précision (Erreur de répétabilité) des échos

$$\sigma_e^2 = \sigma_{\text{Laser}}^2 + \sigma_{\text{Cible}}^2 + \sigma_{\text{DétDépart}}^2 + \sigma_{\text{DétRetour}}^2 + \sigma_{\text{Chronométrie}}^2 + \sigma_{\text{Atmosphère}}^2 + \sigma_{\text{xHorloge}(\tau)}^2 = 20 \rightarrow 100 \text{ ps}$$

- Précision des points normaux

$$\sigma_N = \frac{\sigma_e}{\sqrt{N}} \rightarrow \text{millimétrique}$$

- Exactitude

- » Atmosphère
- » Horloge
- » Définition du point de référence station
- » Position de la cible de référence
- » Définition du point de référence cible
- » Différence de fonctionnement entre cible spatiale et cible de référence
→ centimétrique

Bilan de liaison

$$n_{pe-} = E_T \left(\frac{\lambda}{hc} \right) T_{al} T_r$$

$$n_{pe-} = \alpha 1/d^4$$

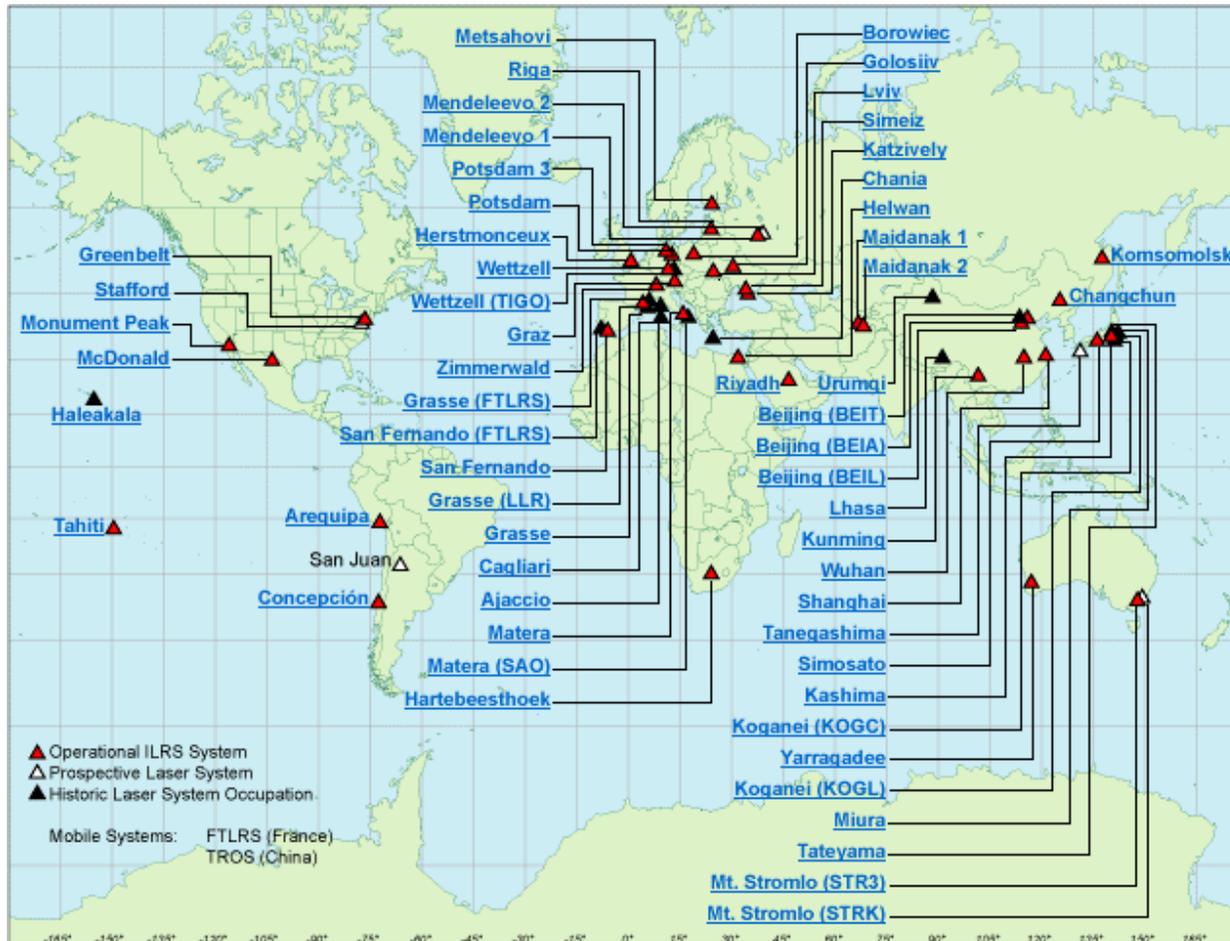
avec : E_T = énergie du laser
 λ = longueur d'onde utilisée
 h = constante de Planck
 c = vitesse de la lumière
 T_r = transmission retour
 T_{al} = transmission aller
 d = distance Station Cible

Distance Terre – Lune : 384 000 km



$$n_{pe-}/n_{hv} = 10^{-20}$$

Réseau de station de télémétrie par laser



Tir laser MéO

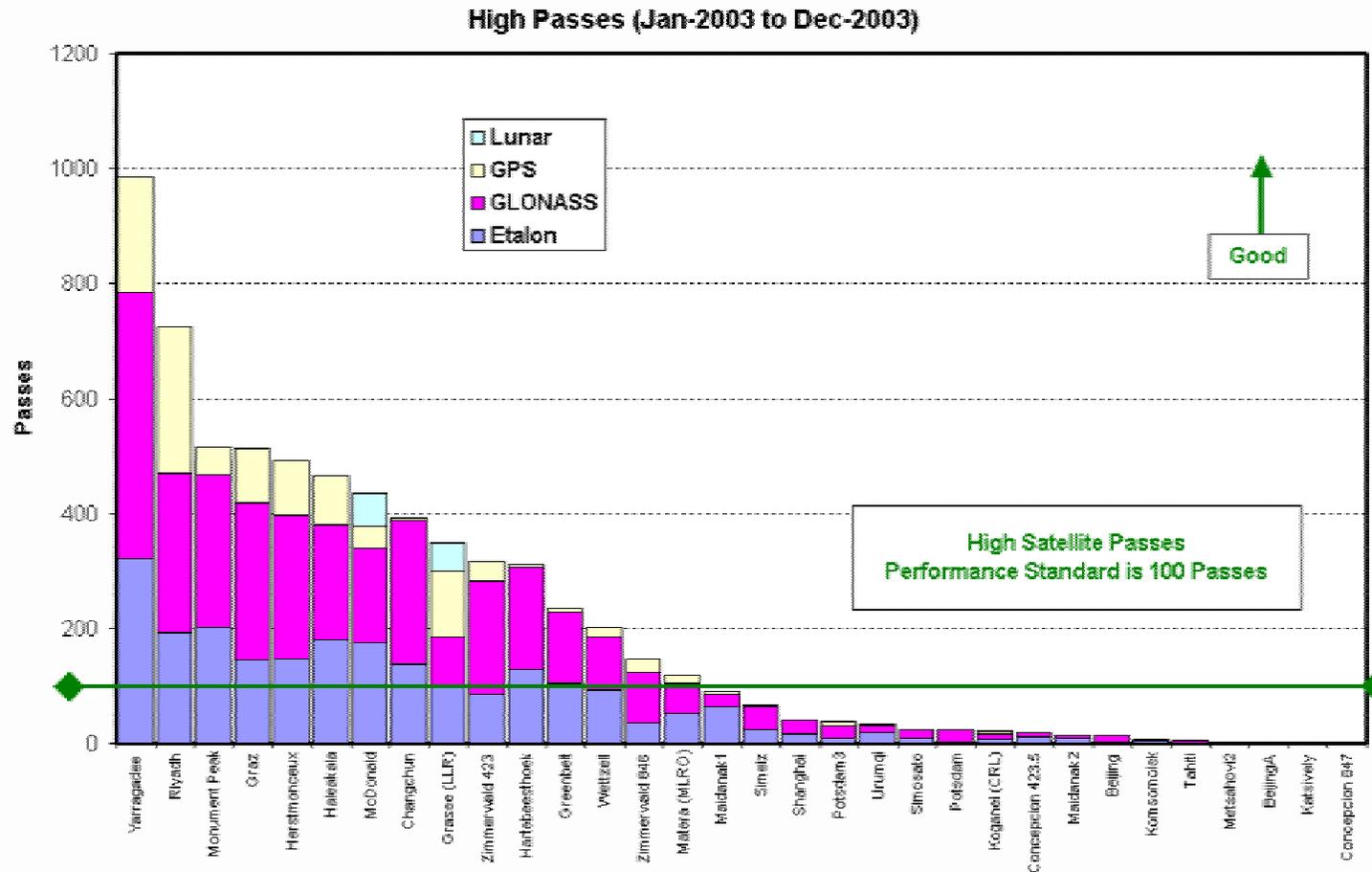


Station FTLRS

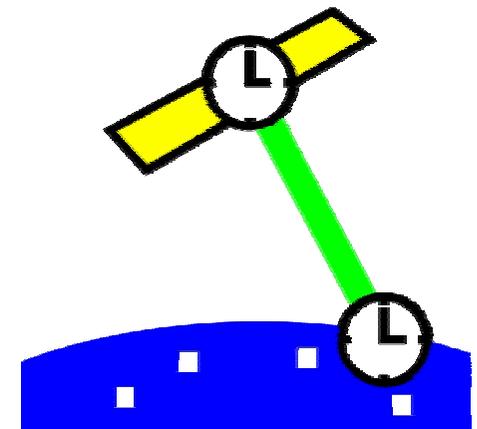


Bilan des observations

Satellites hauts



Transfert de **T**emps par **L**ien **L**aser **T2L2**



R&D METROLOGIE

Objectifs

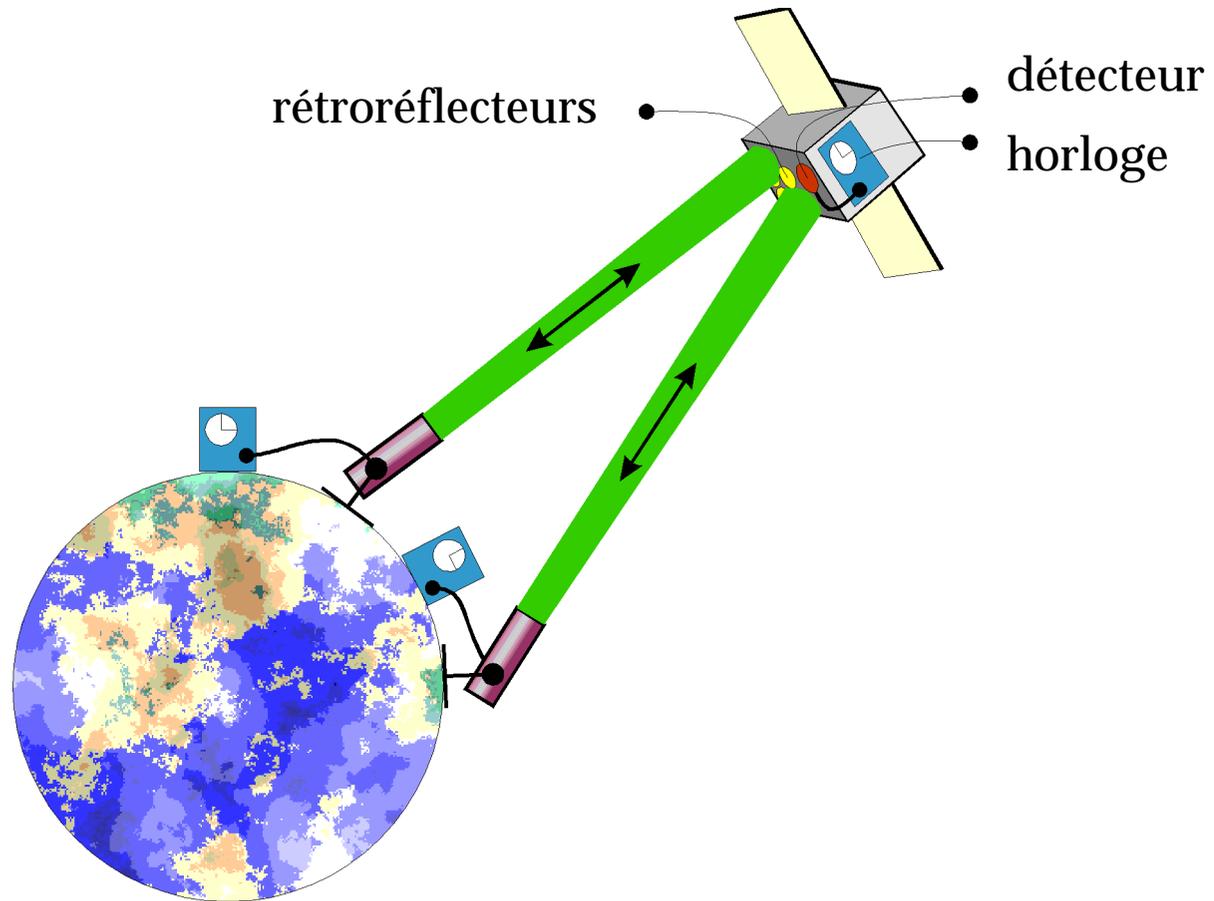
- Construction des échelles de temps
- Qualification transfert de temps sol-sol hautes performances

- Qualification horloges spatiales ultra-stables
- Etalonnage du transfert de temps Galiléo
- Etalonnage de la télémétrie Galiléo

- Mesure de l'anisotropie de la vitesse de la lumière
- Mesure de l'effet Einstein
- Recherche de la dérive de la structure fine de α

- Etude ionosphère/troposphère
- VLBI

Principe



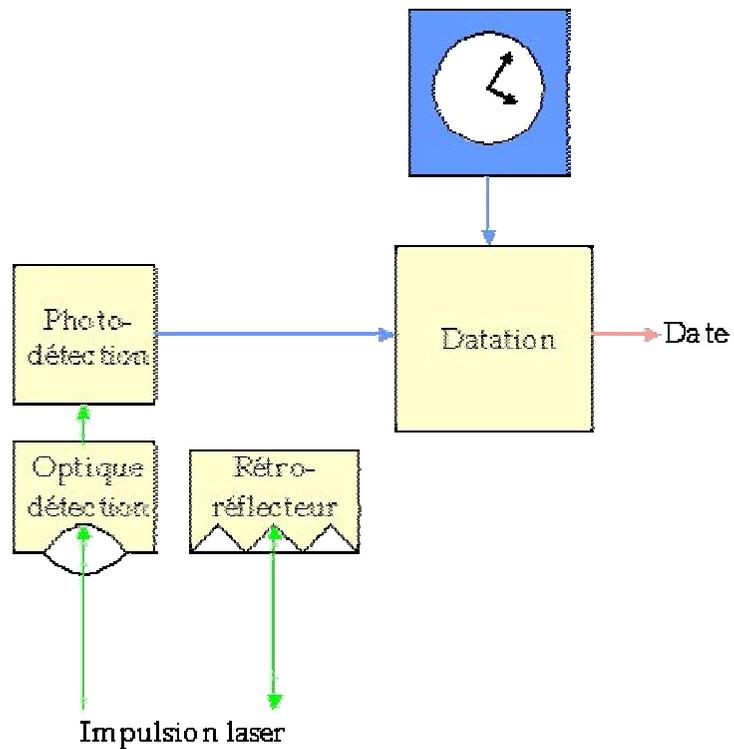
Configuration

- Segment Sol
 - Station de télémétrie par laser
 - Laser
 - Télescope
 - Instrumentation sol T2L2
 - Module de photo-détection
 - Modules de datation
 - Station Météo
 - GPS
- Segment Spatial
 - Module optique de réflexion et de détection
 - Module de photo-détection
 - Module de datation

Segment Sol T2L2



Segment spatial



- Fonction Photo-Détection
- Fonction Réflexion & Détection
- Fonction Datation

Fonction Photo-détection

But : Transformer l'impulsion lumineuse en une impulsion électrique

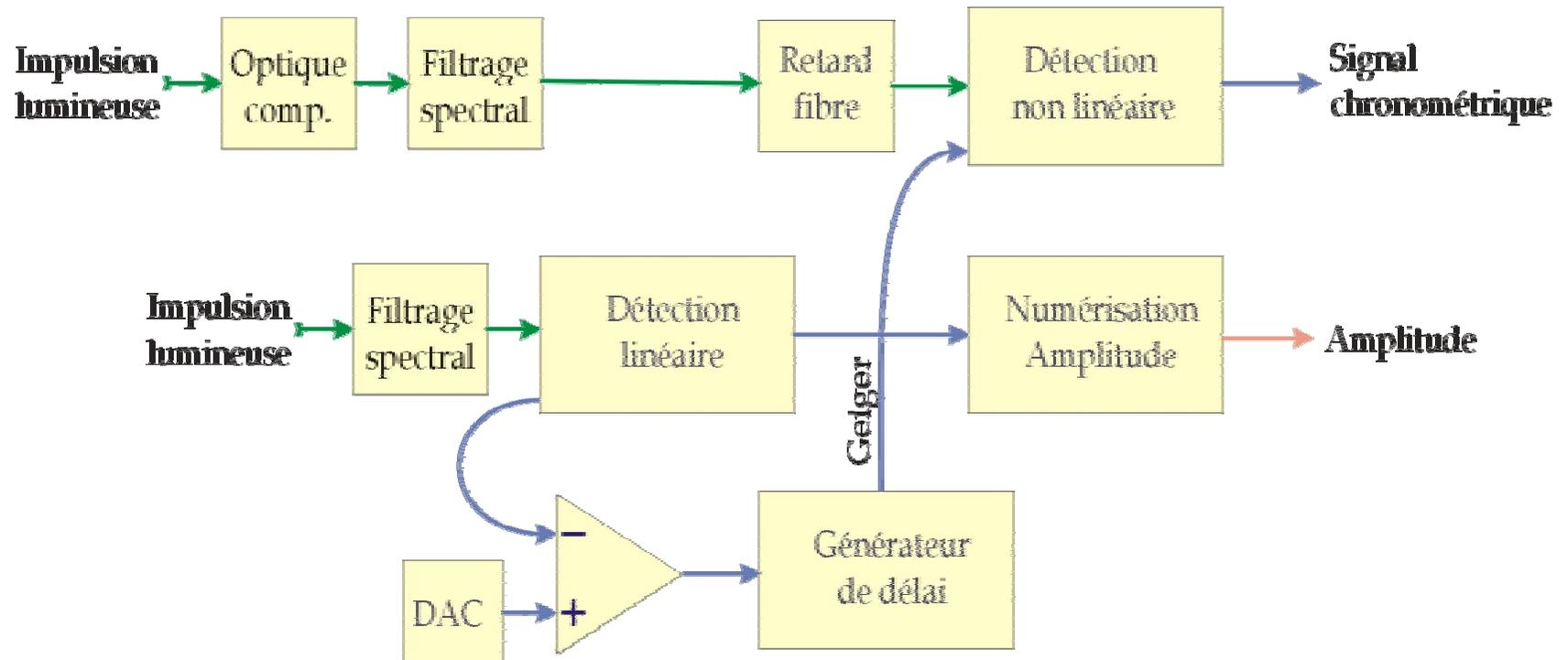
Spécifications :

- Dynamique > 60 dB
- Détection des simples photons
- Précision : 10 ps
- Temps mort : < 100 μ s



Photo-diode à avalanche opérant en mode Geiger compensée par une mesure de niveau

Synoptique Photo-détection

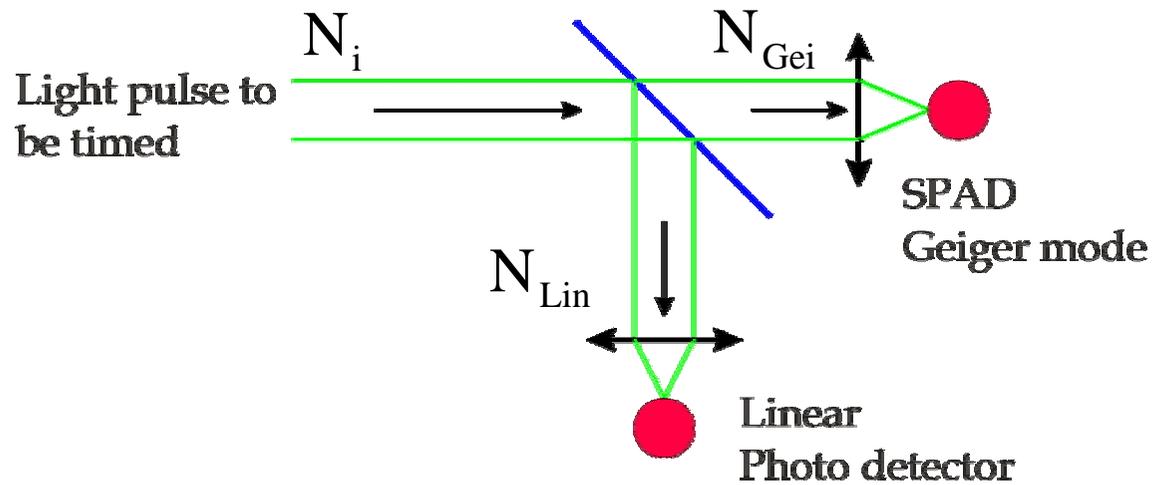


Statistique : Bruit de photon

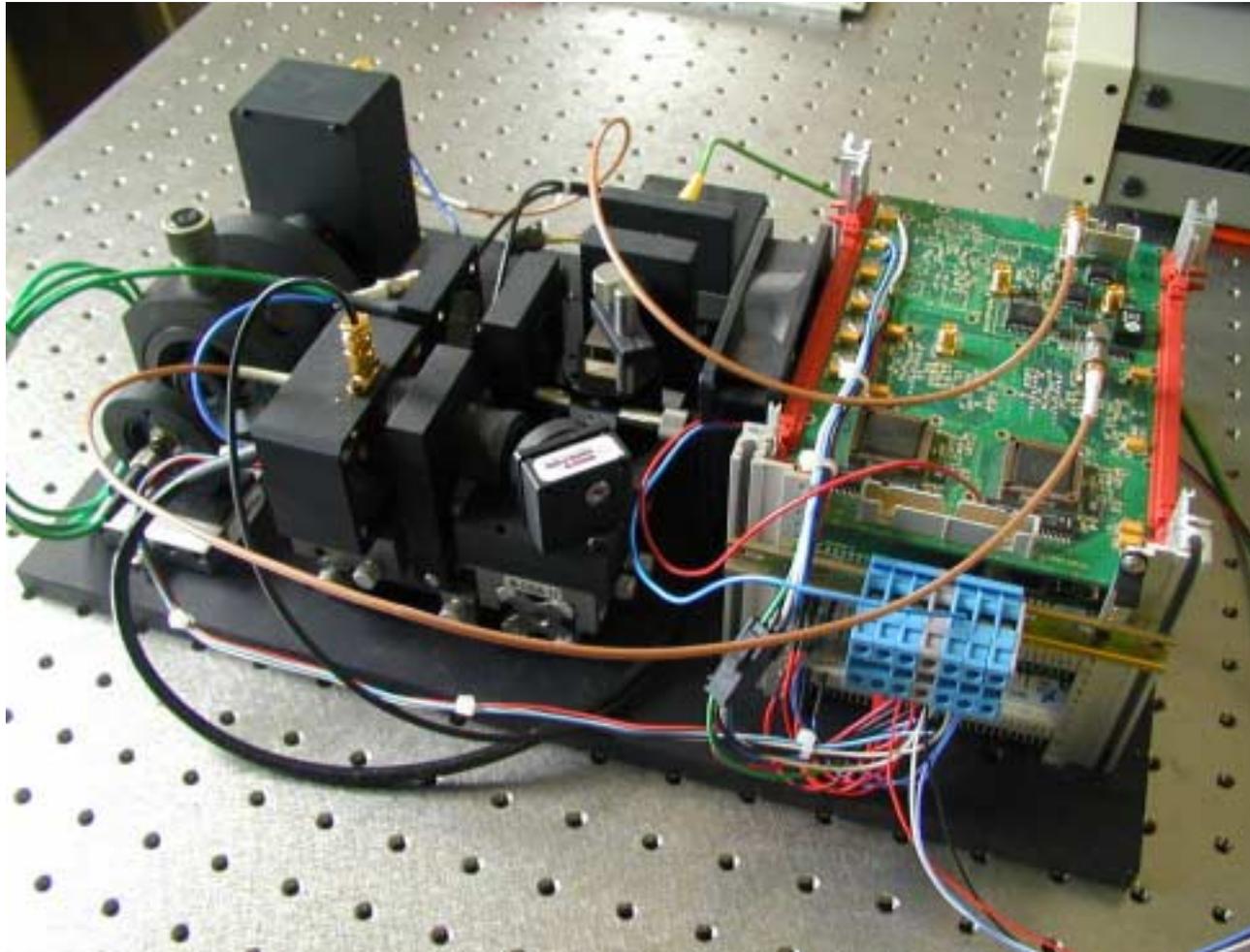
$$N_{\text{Gei}} = \frac{1-r}{r} N_{\text{Lin}}$$

$$\sigma \approx \frac{\tau}{N_{\text{Gei}} \ln 10} \cdot \frac{0,34}{r \cdot p(N_i, N_{\text{Lin}})}$$

$$p(N_i, N_{\text{lin}}) = C_{N_i}^{N_{\text{lin}}} (1-r)^{N_i - N_{\text{lin}}} r^{N_{\text{lin}}}$$

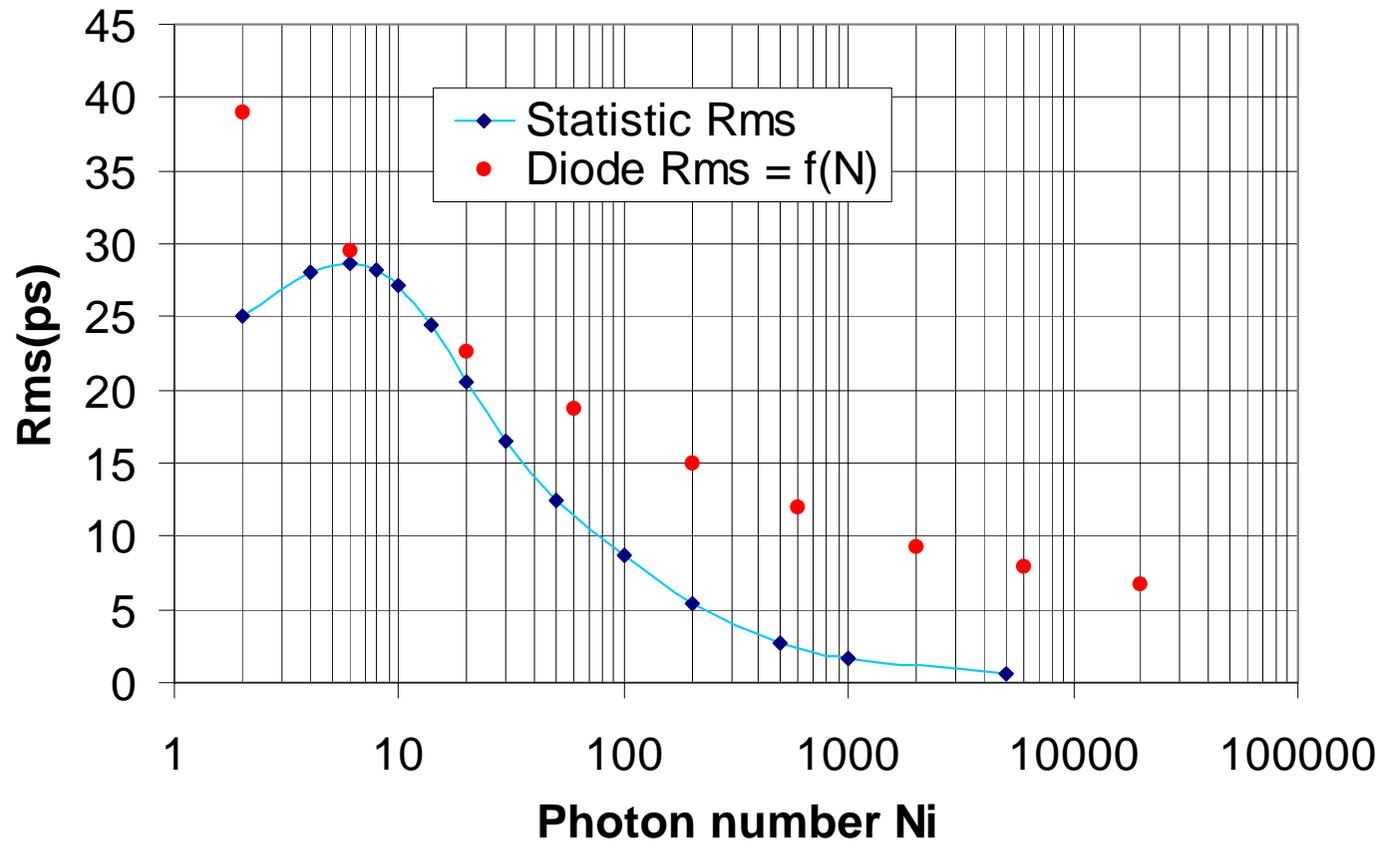


Prototype photo détection



Performances Photo-détection

Précision



Fonction Réflexion

But : Réfléchir l'impulsion lumineuse en direction de la station laser

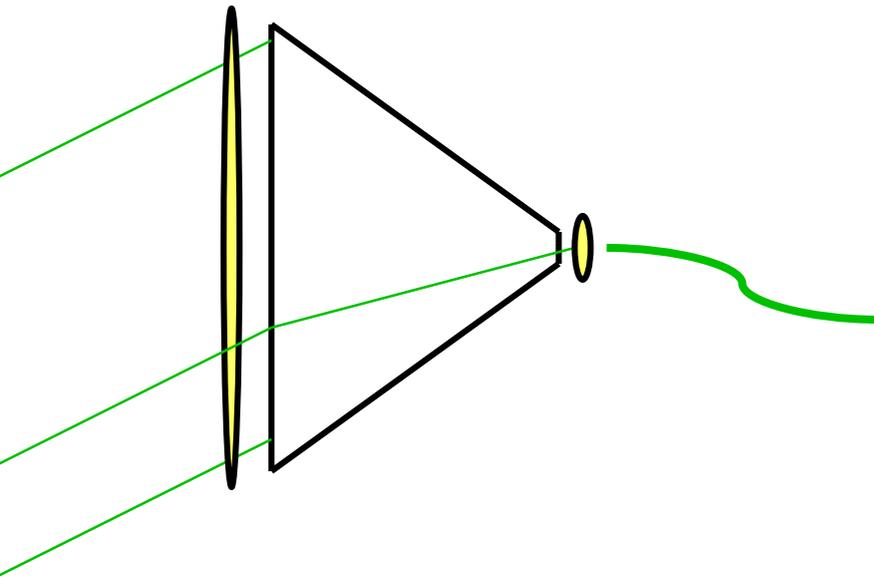
Spécifications :

- Dispersion temporelle à la réflexion réduite
- Correspondance point de réflexion / point de détection
- Perte faible
- Champ de vue important +/- 60°
- Correction aberration de vitesse



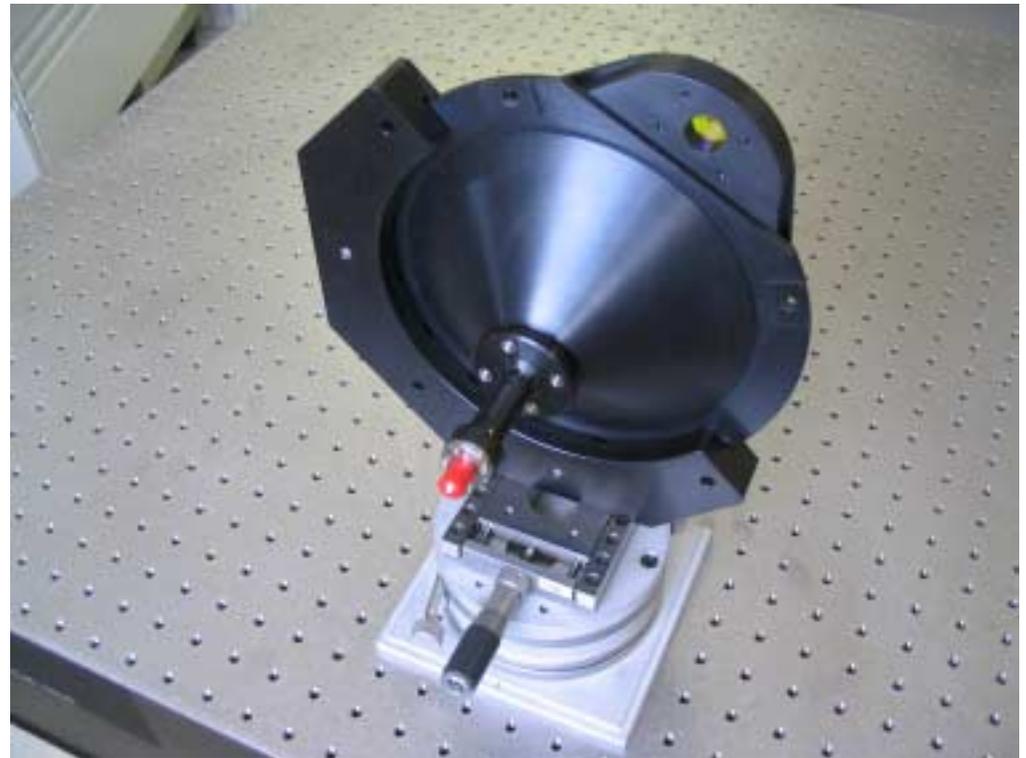
- ✓ **Mono Coin de cube, Photo-détection arrière**
- ✓ Coins de cube placés sur une sphère centrée sur la photo-détection
- ✓ Multi coins de cube, multi photo-détection

Mono Coin de cube

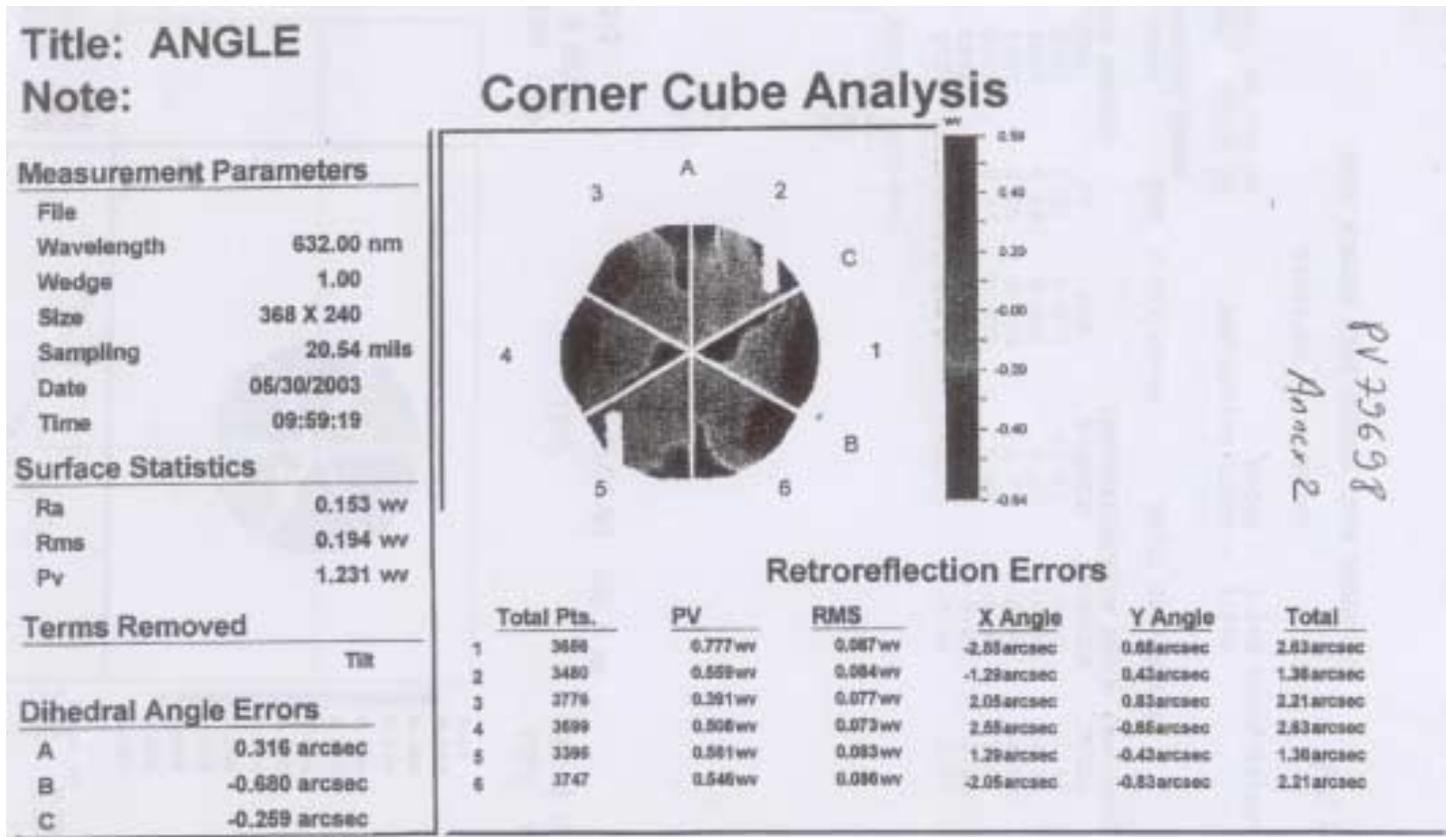


- Champ de vue important
 - ➔ Indice de réfraction élevé
- Point réflexion = point détection
 - ➔ Photo détection sur l'arrête du coin de cube
- Correction d'aberration
 - ➔ Lentille cylindrique
- Grande section efficace aux angles élevés
 - ➔ Coin de cube triangulaire
- Faible dispersion temporelle
 - ➔ Mono coin de cube

Maquette Optique Réflexion Détection



Interferogramme Coin de cube



Fonction Datation

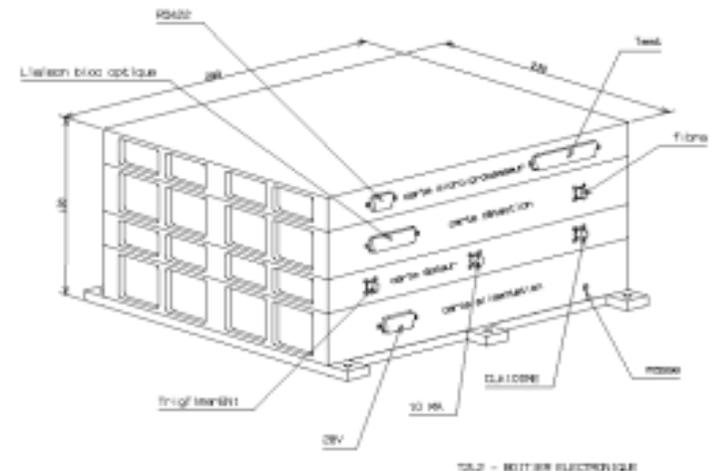
But : Dater les impulsions électriques dans le référentiel de l'horloge de bord

Spécifications :

- Précision : 5 ps
- Stabilité temporelle < 0.2 ps sur 1000 s @ 10 Hz
- Dynamique de mesure : 1 an
- Temps mort < 100 μ s



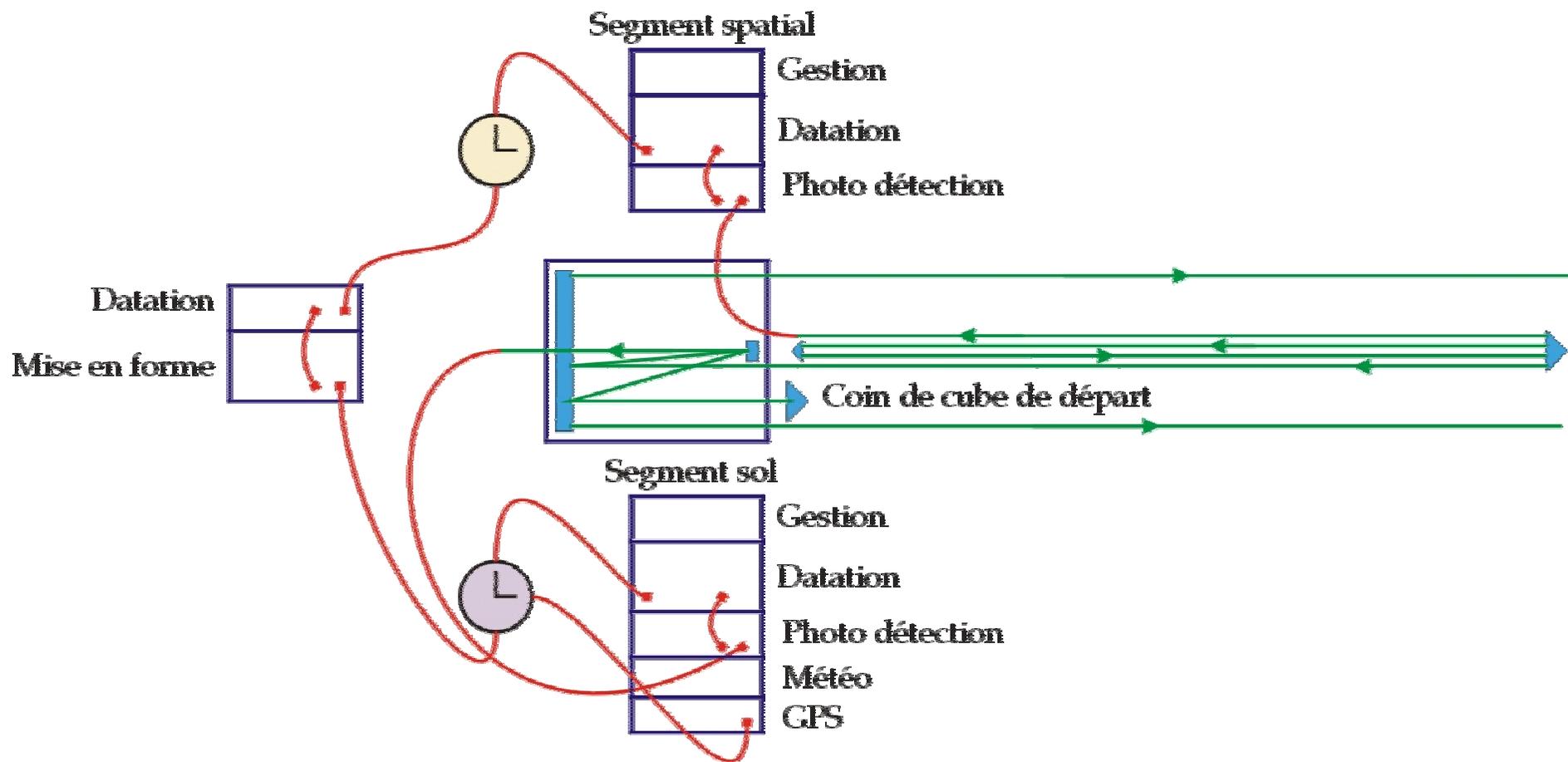
Dateur OCA



Bilan Instrument spatial

- **Bloc électronique**
 - » Volume 250 x 212 x 130 mm³
 - » Masse 7 kg
 - » Puissance 40 W / 28 V
- **Bloc optique**
 - » Volume cône Φ 200 x 100 mm³
 - » Masse 2 kg
 - » Puissance 1 W / 28 V
- **Proposition financière Seso - Eremis**
 - » Bloc électronique 750 k€
 - » Bloc optique 2000 - 2600 k€
 - » Total < 3.35 M€

Synoptique expérience au sol



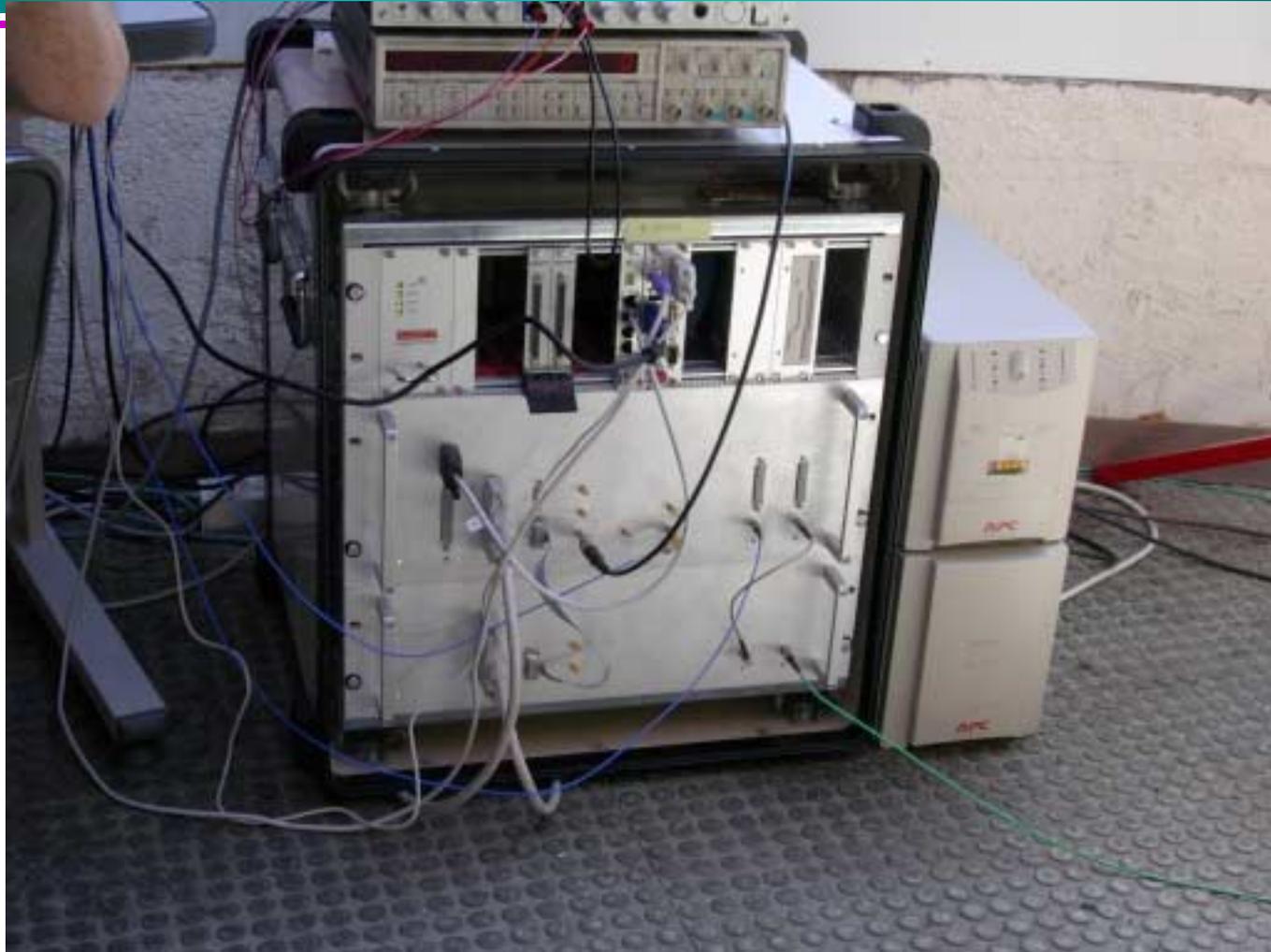
Equerre Optique



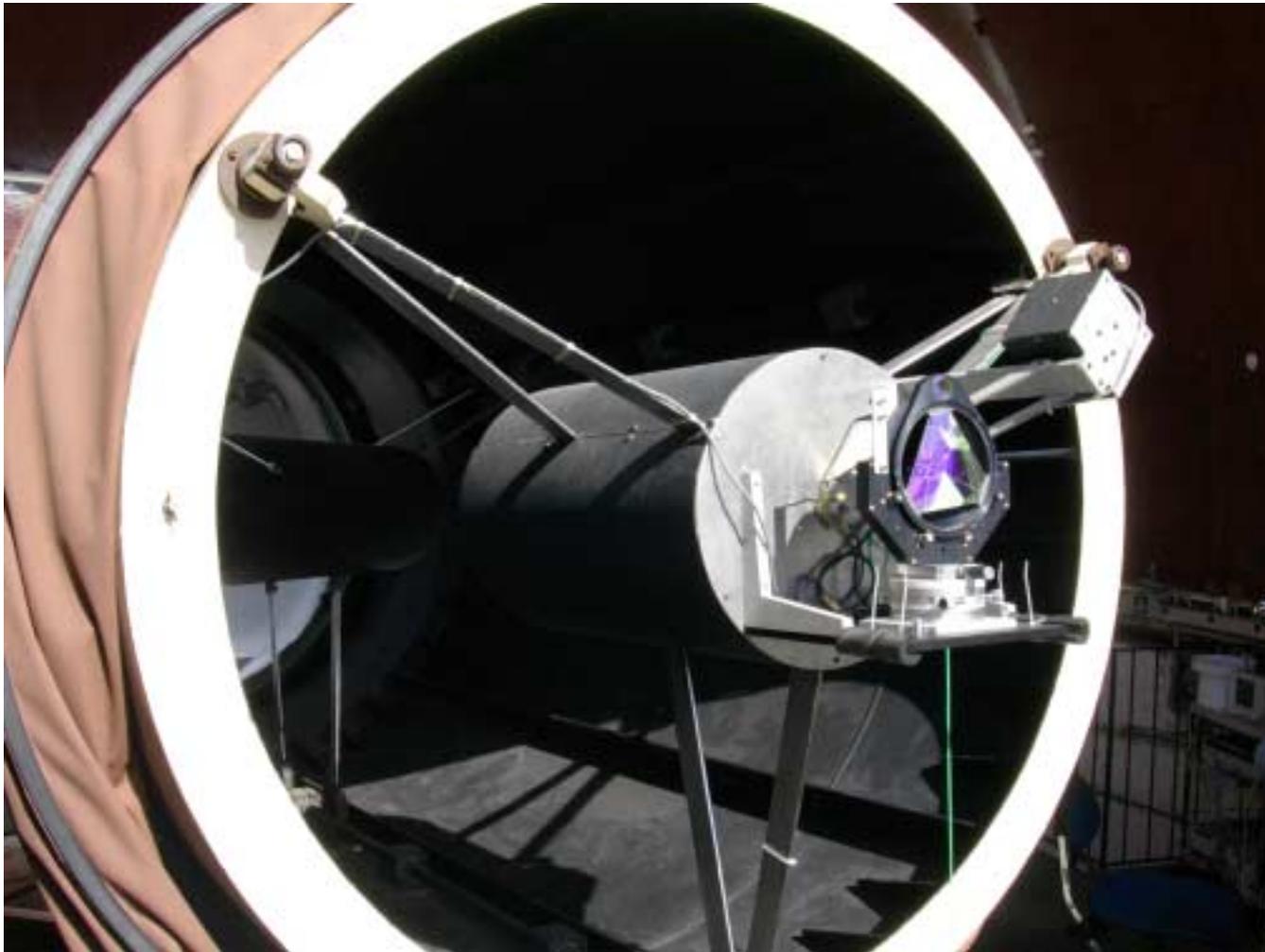
Expérience T2L2 Sol Sol



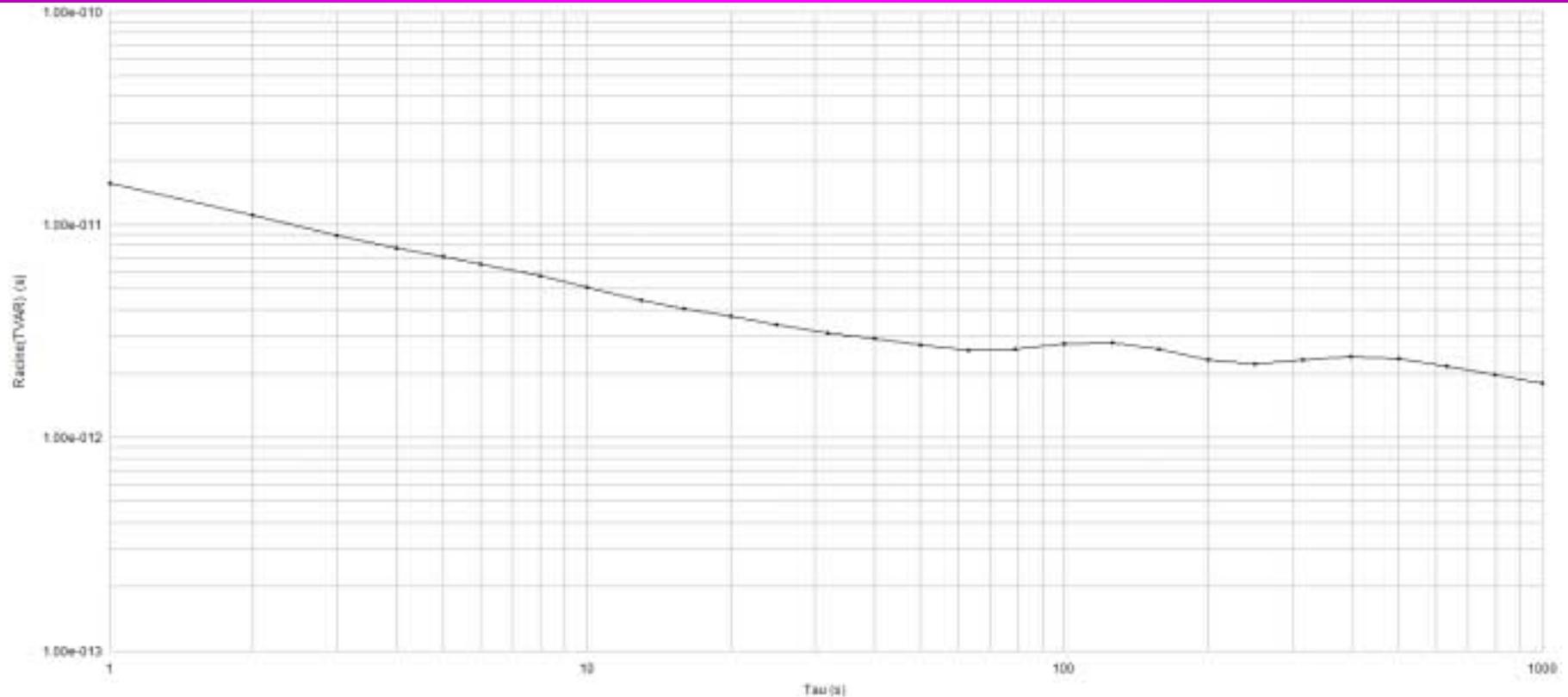
Instrumentation Bord



Maquette Optique



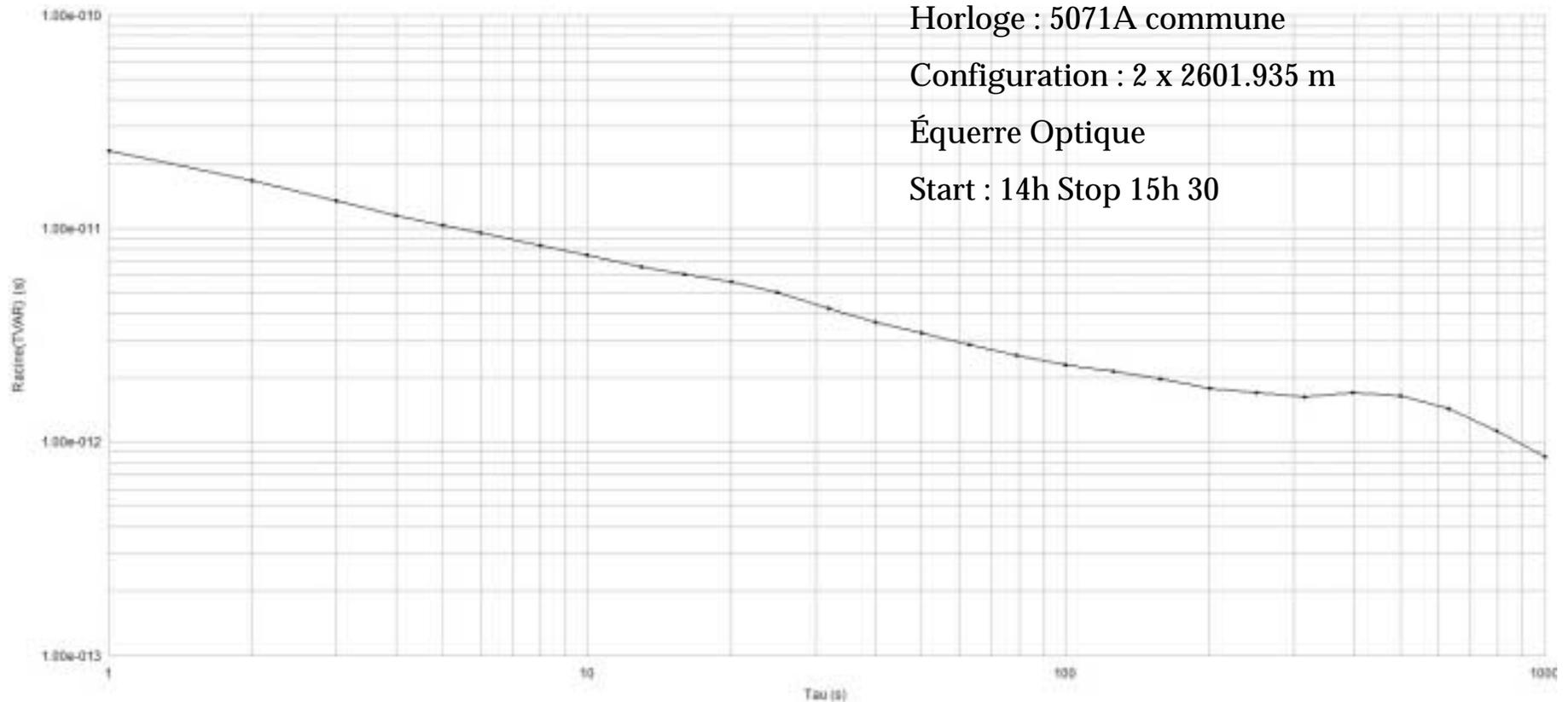
Temps aller retour



$$\sigma_x (1000 \text{ s}) = 2 \cdot 10^{-12} \rightarrow$$

$$\sigma_{\text{point normal}} = 300 \mu\text{m}$$

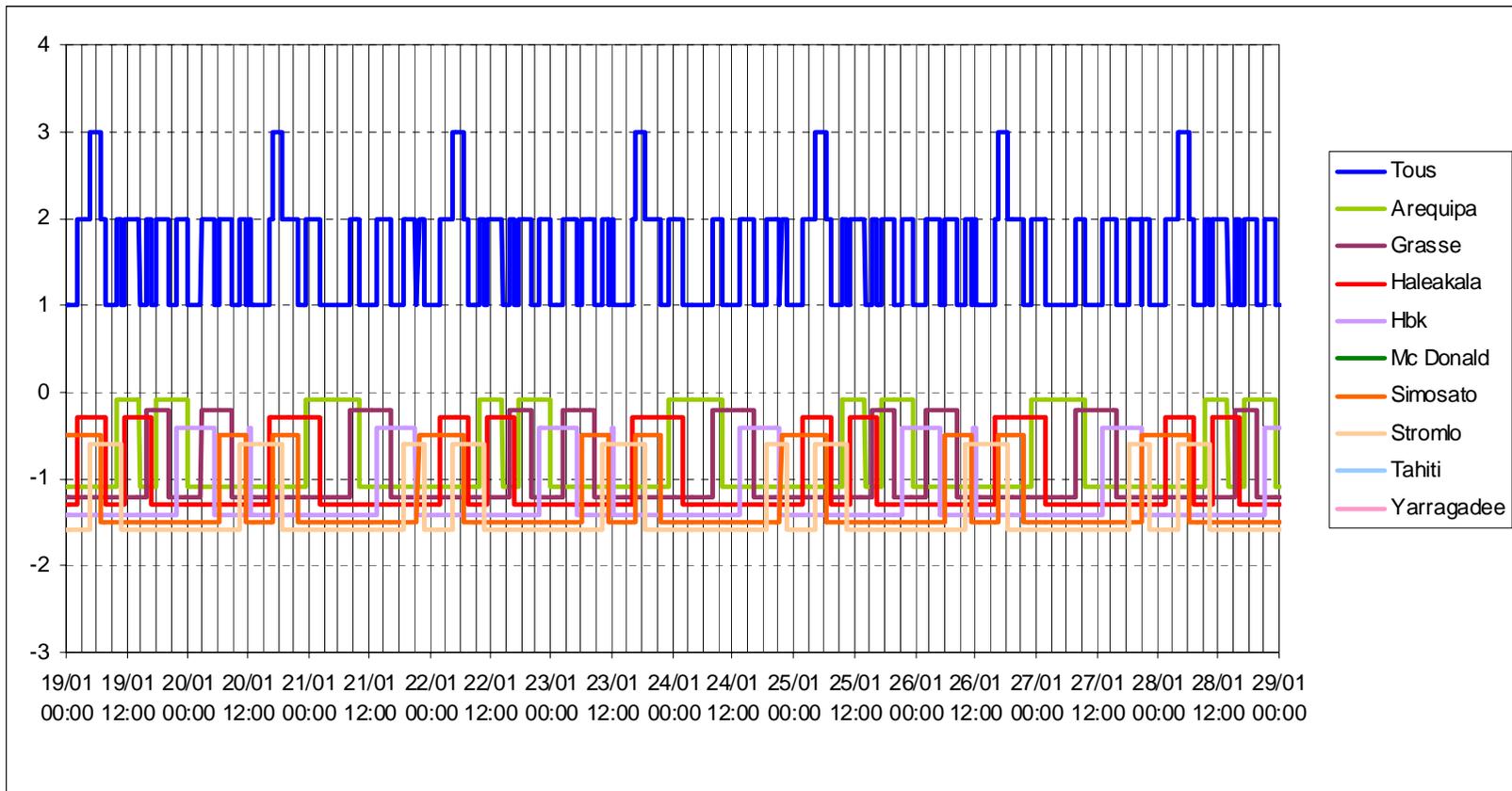
Transfert de temps sol-espace



Bruit blanc de phase $\sigma_x(\tau) = 22 \cdot 10^{-12} \tau^{-1/2} @ \tau_0 = 1 \text{ s}$

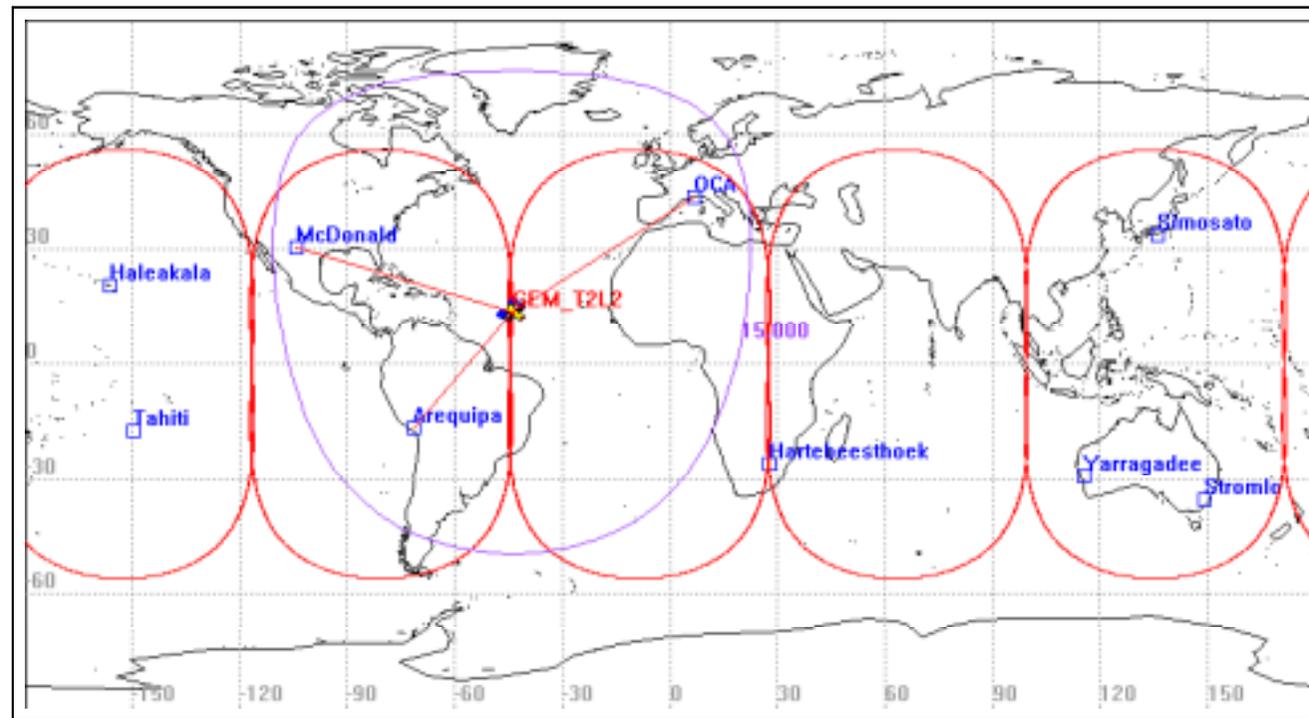
Visibilité Galileo

Modélisation à 6 stations



Visibilité continue

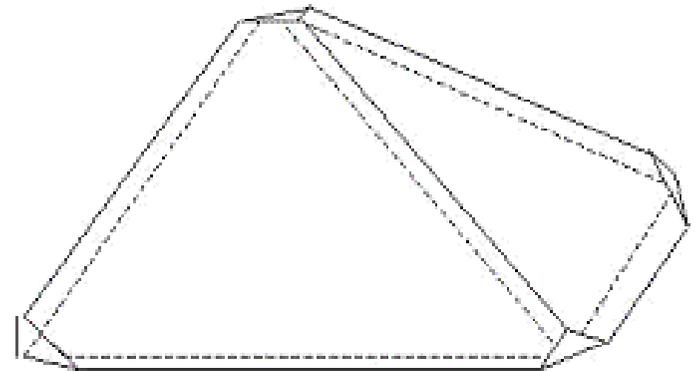
Stations laser de référence Galiléo



Nouvelle cible spatiale Galiléo

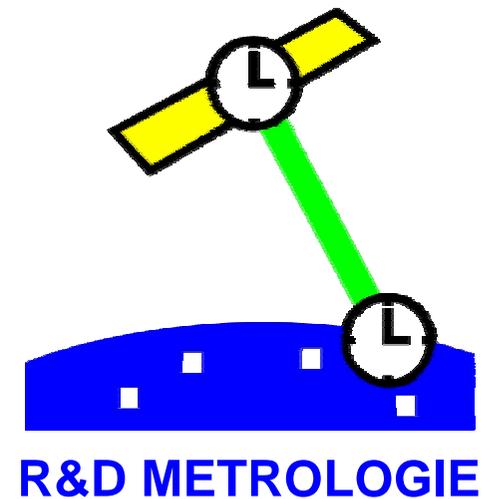
Les cibles laser actuelles ont des profondeurs optiques pouvant aller jusqu'à plusieurs dizaines de centimètres

- + Grande surface de collection
 - Détérioration de l'exactitude et de la précision
-
- » Coin de cube creux
 - » Diamètre 200 mm
 - » Champ de vue +/- 30°
 - » Planéité $\lambda/10$ rms
 - » Erreur θ par face 0.1 "



➔ **R&T CNES Rétro réflecteur creux pour
Télémétrie et transfert de temps optique**

Télémétrie laser dans le système solaire



Objectifs scientifiques

- Paramètres post Newtoniens γ et β
- Moment quadropolaire du soleil J_2
- Moment angulaire du soleil
- Champ de gravité planétaire
- Masses d'astroïdes
- Ondes gravitationnelles

Liens optiques

- Lien laser 1 voie basé sur des horloges
- Lien laser 2 x 1 voie : transpondeur
- Lien laser CW interférométrique 2 x 1 voie

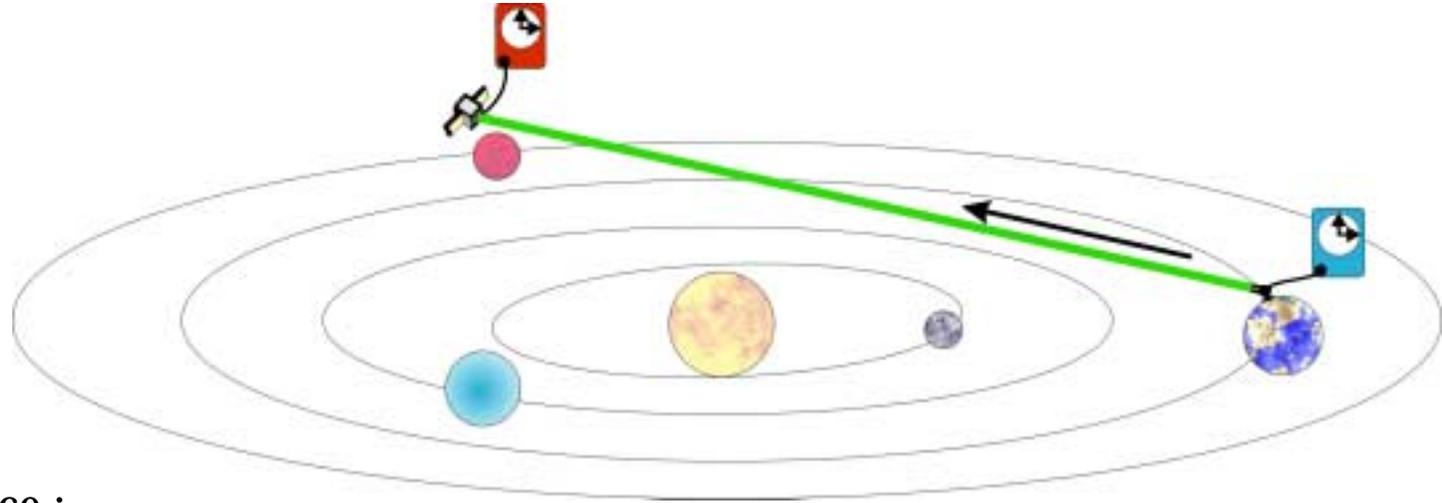
Bilan de liaison

Lien laser

- Télémétrie par laser deux voies
 - » Bilan de liaison : $\propto 1/d^4$
 - » Distance limite : Terre-Lune : 10^{-20}
 - Emission : 10^{18} photons par tir @ 10 Hz
 - Réception : 1 photon @ 0,1 Hz
- Télémétrie par laser une voie ou 2 x 1 voie
 - » Bilan de liaison : $\propto 1/d^2$
 - » Distance limite : au-delà du système solaire
 - » Projet TIPO (Télémétrie InterPlanétaire Optique)

Principe Lien laser 1 voie

Mesure distance radiale



Incertitude en distance :

$$\delta l \approx \frac{\delta \nu}{\nu} \tau c$$

$$\delta l = \sigma_y(\tau) \tau c = \sigma_x(\tau) c$$

τ : temps d'intégration

σ_y^2 : Variance d'Allan

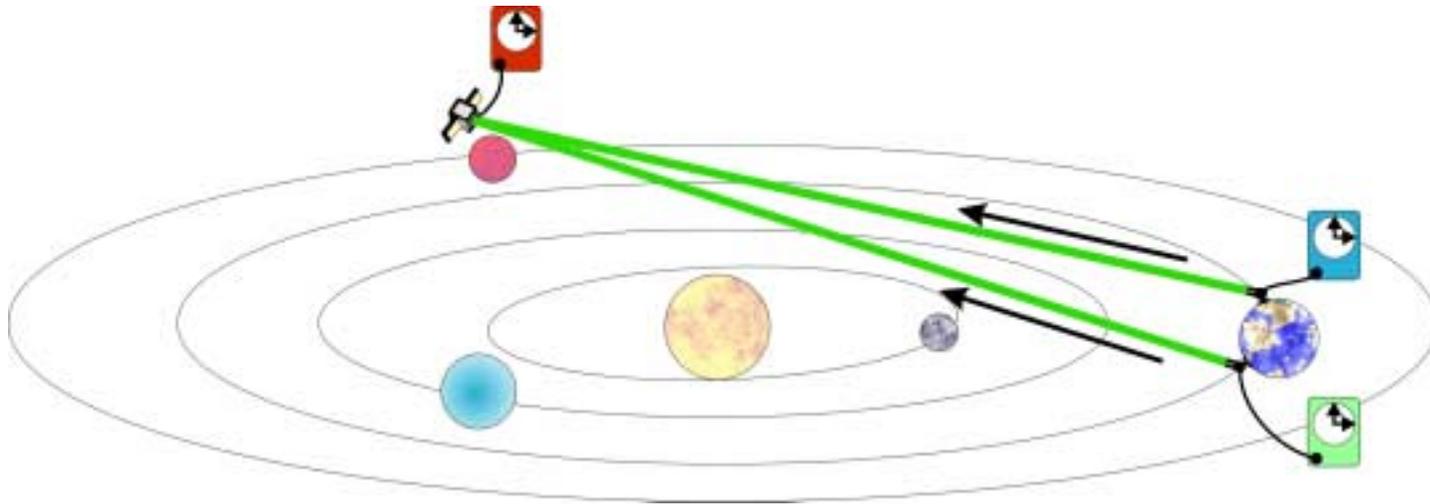
σ_x^2 : TVAR

Horloges atomes froids : 10^{-16}



Mesure différentielle sur 10 jours ~ qq mm
Mesure exacte : temps d'intégration 1 an ~ 1 m

Lien laser 1 voie Mesure angulaire



Longueur de base au sol : $B \sim 10\,000\text{ km}$

Mesure différentielle entre les stations : $\delta x = 10^{-2}\text{ m}$

Synchronisation des horloges sol : $\delta t = 30 \cdot 10^{-12}\text{ s}$



Détermination angulaire : $\delta\alpha = \frac{1}{B} (\delta x + c \delta t) = 2 \cdot 10^{-9}\text{ rd} = 200\text{ m @ } 100\text{ millions de km}$

Rapport signal sur bruit

- Rapport signal sur bruit

$$R = \frac{N_{\text{laser}}}{\sqrt{N_{\text{laser}} + \left(\frac{i_{\text{brt}}}{q_{e^-}} + \frac{i_d}{q_{e^-} G} \right) \delta t}}$$

- Nombre de photo-électrons reçus par tir

$$N_{\text{laser}} = \frac{E\lambda}{hc} \frac{4}{\pi \theta^2 d_{\text{tc}}^2} \rho_{\text{dét}} \rho_{\text{atm}} \rho_{\text{optr}} \rho_{\text{opte}} S_{\text{dét}}$$

Bruit photons terrestres

- Flux solaire reçu sur terre dans $\delta\lambda$ (W/m^2)

$$\Phi_s = \frac{R_s^2}{d_{ts}^2} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 e^{hc/\lambda kT_s} - 1} \delta\lambda$$

- Puissance solaire diffusée par la terre reçue sur cible (W)

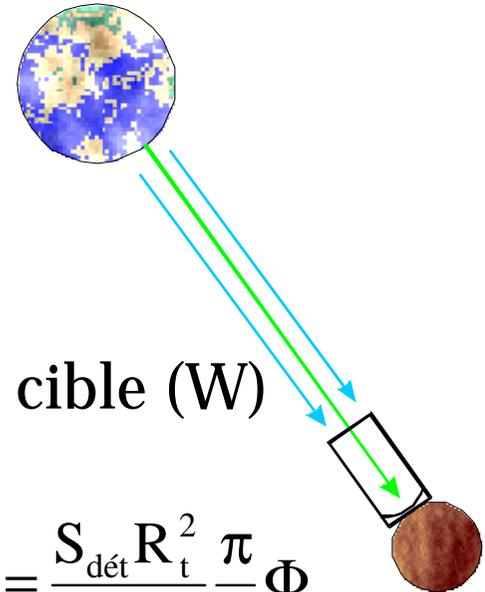
$$P_{\text{brt}} = \int_0^{\pi/2} \Phi_s \cos \varphi F 2\pi R_t \cos \varphi R_t d\varphi$$

$$F = \frac{S_{\text{dét}}}{d_{tc}^2} \frac{1}{2\pi}$$

$$P_{\text{brt}} = \frac{S_{\text{dét}} R_t^2}{d_{tc}^2} \frac{\pi}{4} \Phi_s$$

- Courant généré

$$i_{\text{brt}} = P_{\text{brt}} \frac{\lambda}{hc} \rho_{\text{dét}} \rho_{\text{optr}} q_{e^-}$$



Mars

- Données

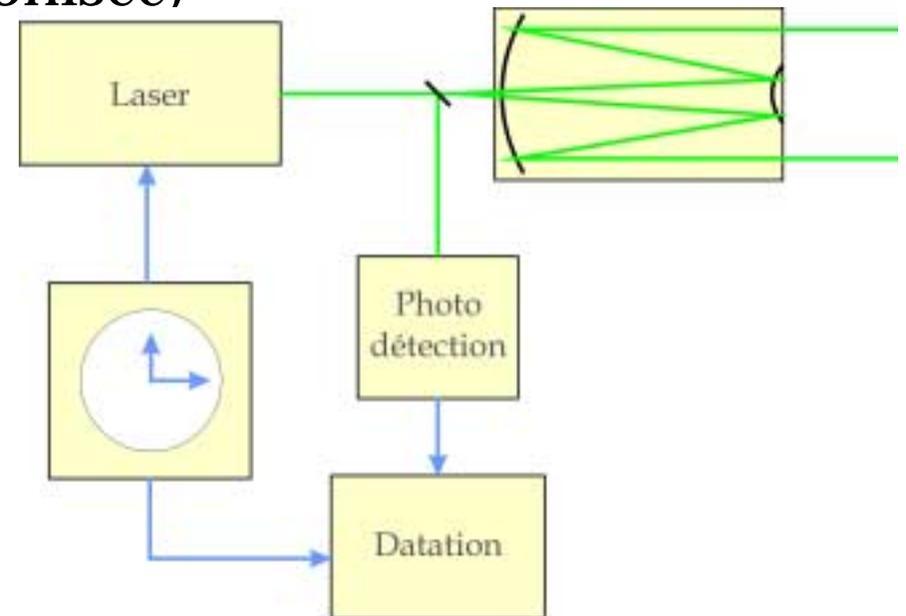
- » Distance : $60 \cdot 10^6 \text{ km} < d_{\text{tc}} < 380 \cdot 10^6 \text{ km}$
- » Divergence laser $\theta = 5 \text{ arcsec}$
- » Rendement détecteur $\rho_{\text{dér}} = 0.1$
- » Transmission atmosphérique $\rho_{\text{atm}} = 0.7$
- » Transmission optique réception $\rho_{\text{optr}} = 0.25$
- » Transmission optique émission $\rho_{\text{opté}} = 0.5$
- » Énergie par tir : $E = 300 \text{ mJ}$
- » Surface de détection $S = 8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ (100 mm)
- » Temps caractéristique détecteur $\delta t = 1 \text{ ns}$



- Signal : $0.8 < N_{\text{laser}} < 31 \text{ e-}$
- Rapport signal sur bruit : $0.9 < R < 5.5$
- Filtrage temporel basé sur des impulsions laser émises avec un code pseudo-aléatoire

Station sol

- Émission, pas de réception
- Émission de codes pseudo-aléatoires
- Datation départ exacte (synchronisée)



Bilan d'erreur

Lien laser 1 voie Horloge 10^{-16}

- Précision

$$\sigma^2 = \sigma_{\text{Laser}}^2 + \sigma_{\text{Détecteurs}}^2 + \sigma_{\text{Chronométries}}^2 + \sigma_{\text{Atmosphère}}^2 + \sigma_{\text{xHorloges}}^2(\tau)$$

≈ $\tau < 10$ jour : millimétrique

≈ $\tau > 10$ jour : limité par la stabilité de l'horloge

$$\tau = 10 \text{ j } \quad \sigma \sim 100 \text{ ps } ; \delta l = 3 \text{ mm}$$

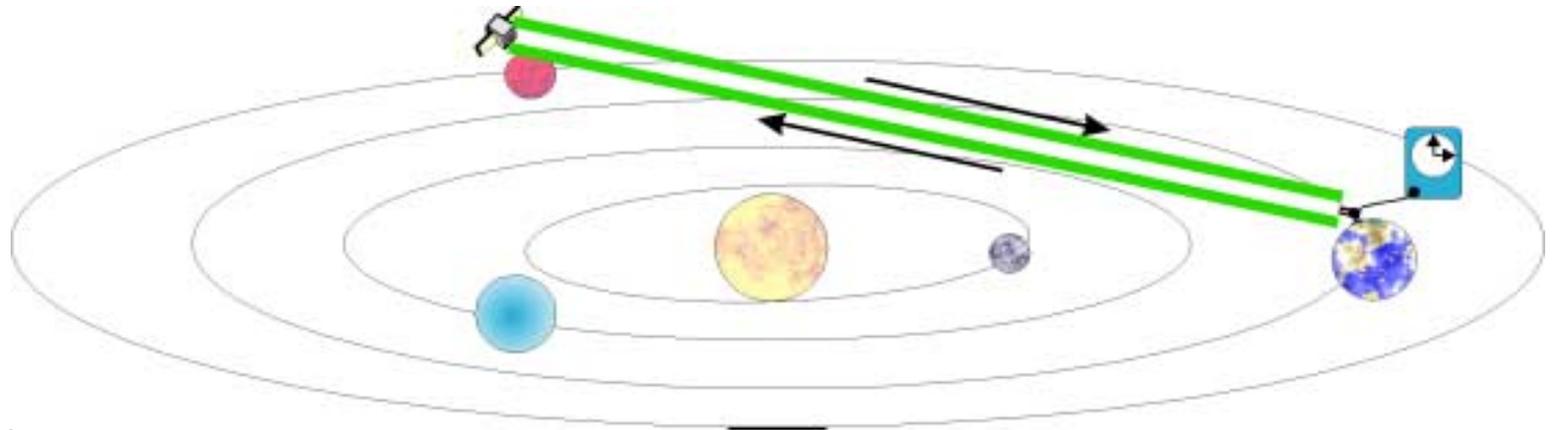
$$\tau = 1 \text{ an} \quad \sigma \sim 3 \text{ ns } ; \delta l = 1 \text{ m}$$

- Exactitude

» Temps d'intégration : 1 an : limité par l'exactitude de l'horloge

≈ $\delta l = 1 \text{ m}$

Télémétrie laser 2 x 1 voie par transpondeur optique



Incertitude en distance :

$$\delta l \approx \frac{\delta \nu}{\nu} \tau c$$

$$\delta l = \sigma_y(\tau) \tau c = \sigma_x(\tau) c$$

τ : temps de propagation ~ 1000 s

σ_y^2 : Variance d'Allan

σ_x^2 : TVAR

Fontaine atomique : 10^{-15}



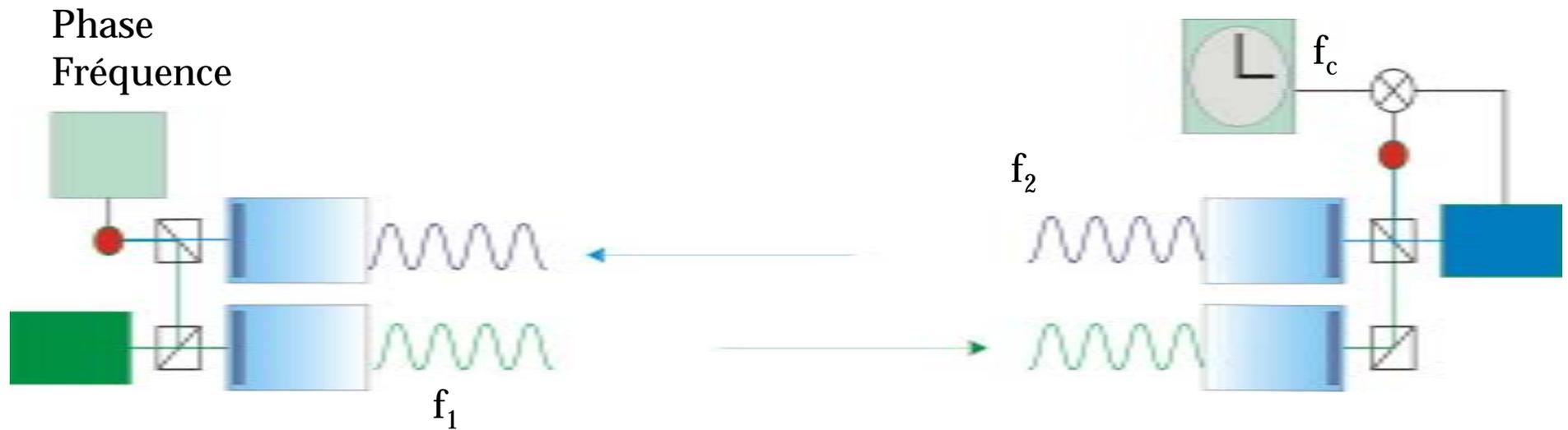
Mesure exacte millimétrique

Téléométrie à Transpondeur

Asynchrone Terre-Mars [Degnan et al]

- Tête optique (15 cm x 32 cm)
 - » Lunette 15 cm d'ouverture sur monture 2 axes
 - » Laser 2 kHz 150 μ J 140 ps (15% de rendement : consommation qqs Watts)
 - » MCP
 - » CCD (pointage fin \sim 10 arcsec)
 - » Filtre
- Système complémentaire
 - » Horloge atomique miniature (stabilité $\sim 10^{-12}$ sur quelques minutes)
 - » Dateur numérique, précision 250 ps, < 1 kg, 10 Watts
 - » Electronique de commande laser
 - » Ordinateur de bord

Lien interférométrique 2 x 1 voie Hétérodyne



δf doppler +/- 70 GHz

$$\delta(f_2 - f_1) = \frac{f_1}{f_c} \frac{\delta f_c}{f_c}$$

Bilan d'erreur

- Incertitude relative de distance dominée par le bruit de photon

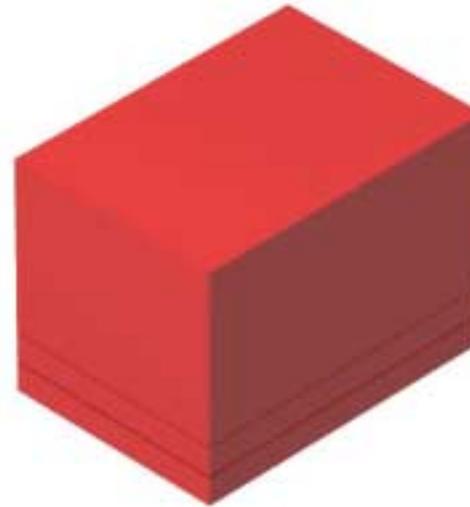
$$\frac{\delta L}{L} = \frac{\lambda}{2\pi L} \sqrt{\frac{h\nu}{\eta P \tau}}$$

- $L = 300 \cdot 10^6$ km, $P = 30$ fW, $\lambda = 1$ μ m, $T = 1000$ s

$$\frac{\delta L}{L} = 2 \cdot 10^{-22}$$

TIPO 1 voie

- Télémétrie 1 voie en orbite planétaire
- Horloge dans la classe des 10^{-15}
- Télescope 100 mm (2 ua)
- Volume :
 - » Electronique : 220 x 155 x 160
 - » Optique : 110 x 120
- Masse : 9 kg



Horloge

Chronométrie

Convertisseur



Optique Photo-détection

Horloge Spatiale

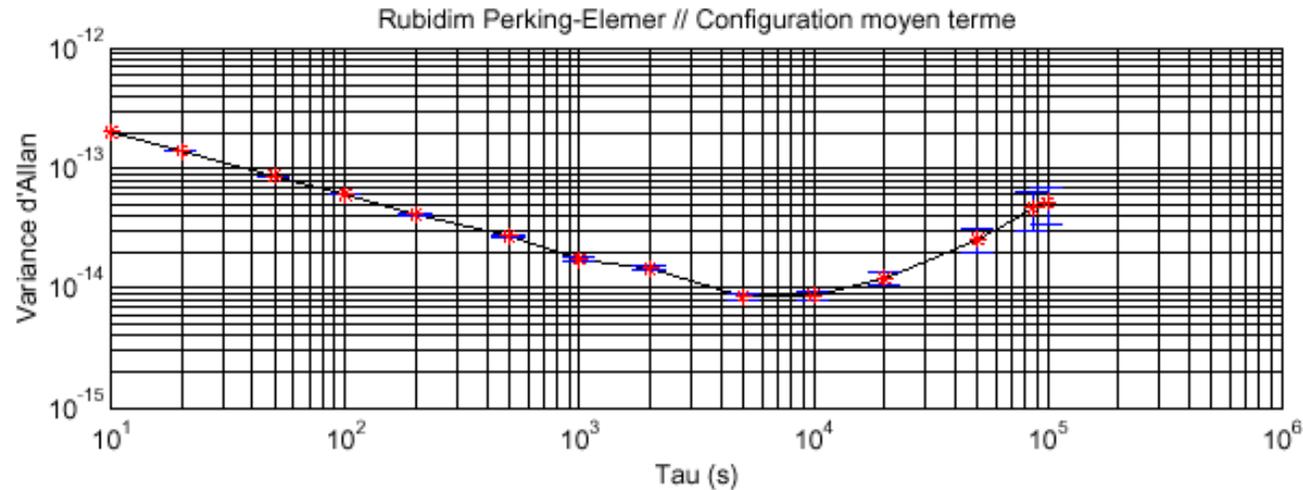
- Perking Elmer
- Type : Rubidium
- $\sigma_y(\tau) = 6.5 \cdot 10^{-13} \tau^{-1/2}$ pour $\tau < 10\,000$ s
- Incertitude fréquence $\sim 10^{-12}$

- Masse 6 kg
- Volume : 216 x 153 x 120
- Prix $\sim 180\,000$ \$

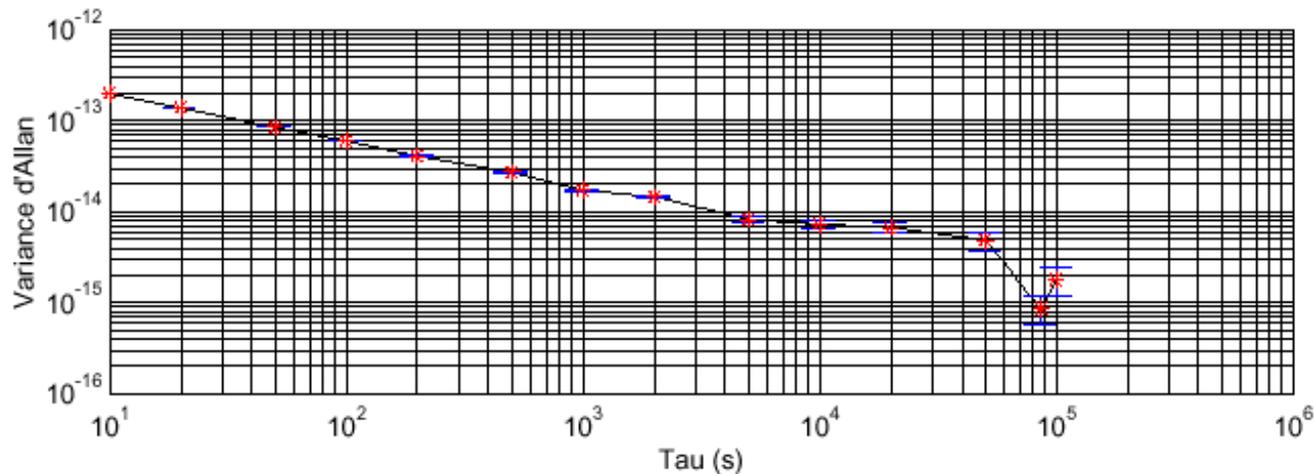
Rubidium Perking Elmer

Stabilité (conditions optimales)

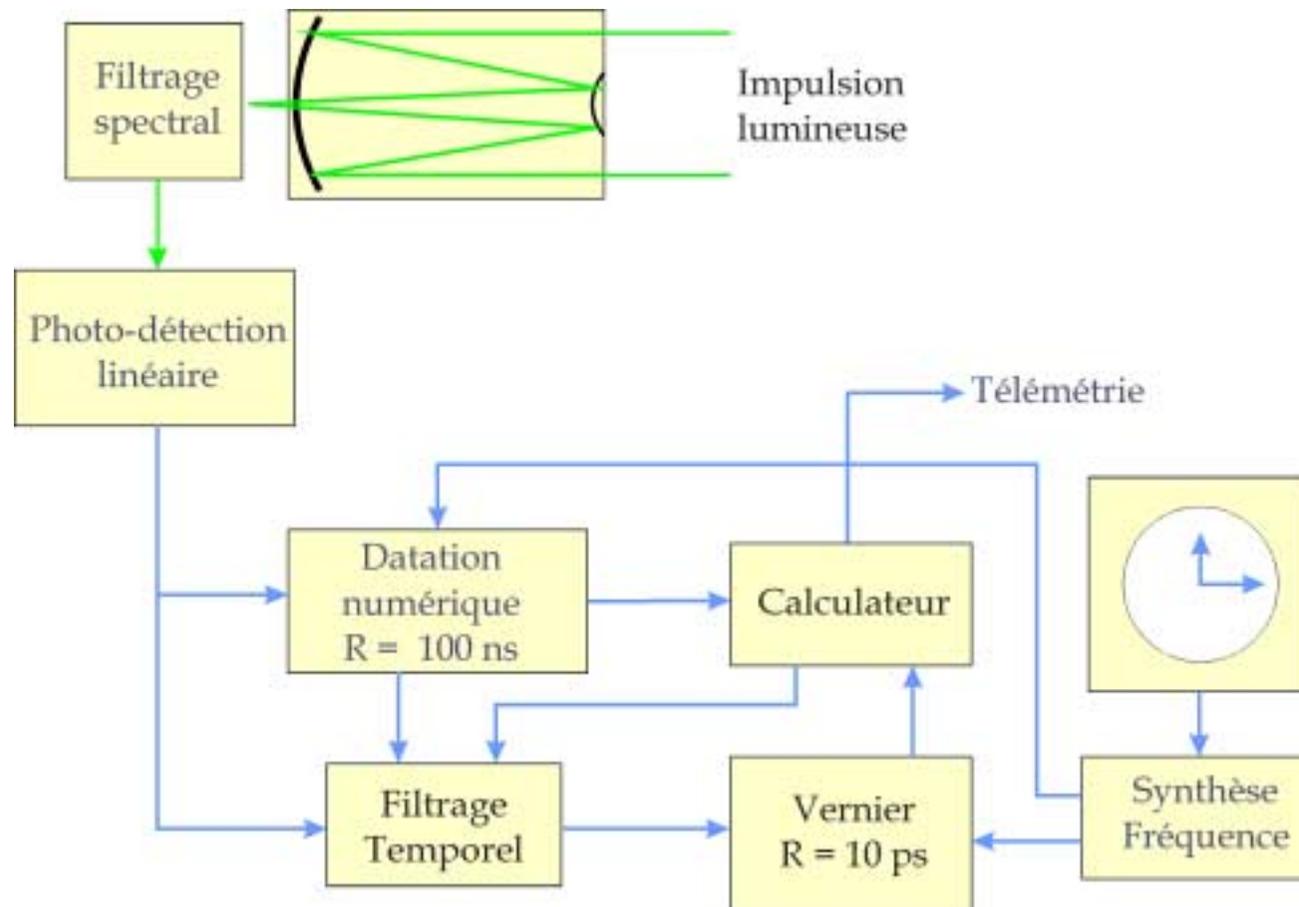
Brute



- dérive
fréquence
 $\Delta T = 3.5$ j



Synoptique Instrument Spatial

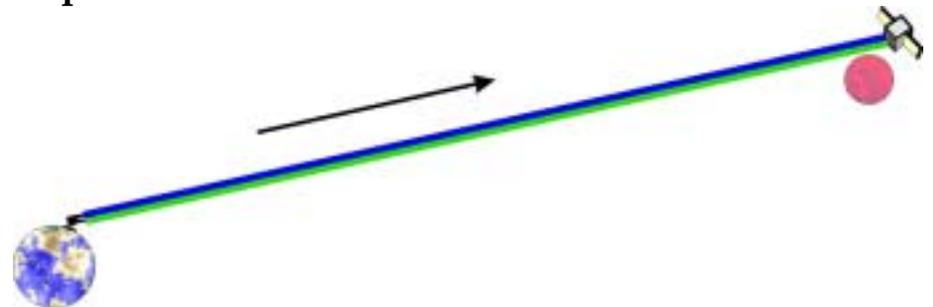


Analyse du champ de gravité Mars

- Champ de gravité local (mascon, volcan, prévision d'orbite)
 - » 1000 km ; durée d'analyse : $\tau = 300 \text{ s} \Rightarrow \sigma_x(300) = 5 \text{ ps}$
 - » Télémétrie centimétrique
- Champ de gravité global (masse de la planète)
 - » Durée d'analyse : $\tau = 10000 \text{ s} \Rightarrow \sigma_x(10000) = 30 \text{ ps}$
 - » Hsat = 4000 km : $\frac{\delta M}{M} = 10^{-9}$

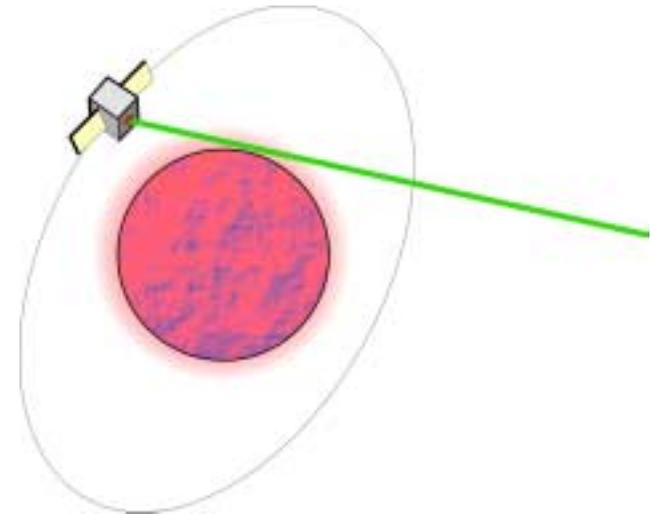
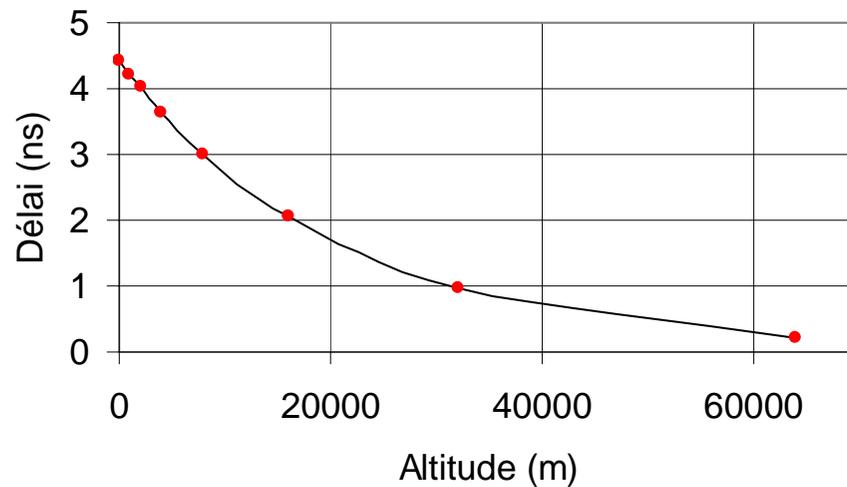
Navigation

- Performances
 - » Différentielle radiale : centimétrique/jour
 - » Absolue tangentielle : 200 m
- Méthode complémentaire au système de navigation micro-onde
- Détermination temps réel
 - » Temps aller-retour des signaux : $400 < \Delta t < 2500$ s
 - » Transfert des dates de départ et des positions des stations
 - » Résolution à bord de la solution



Mesure atmosphérique optique

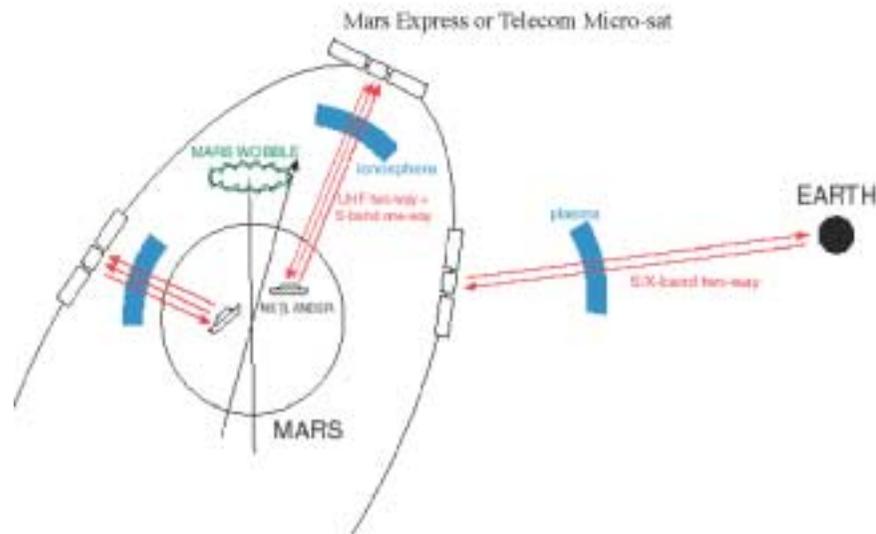
$$\delta t = \frac{2}{c} \int_0^{\infty} (1 - n(x)) dx$$



Hsat = 500 km : durée analyse 40 s

Analyse du milieu interplanétaire

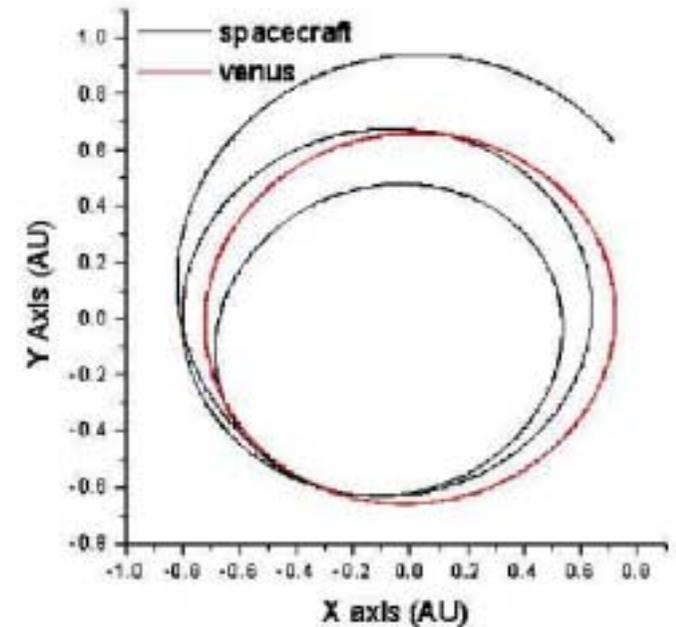
- Neige
 - » Bande S et X
- Tipo
 - » Optique



TIPO 2 voies – ASTROD I

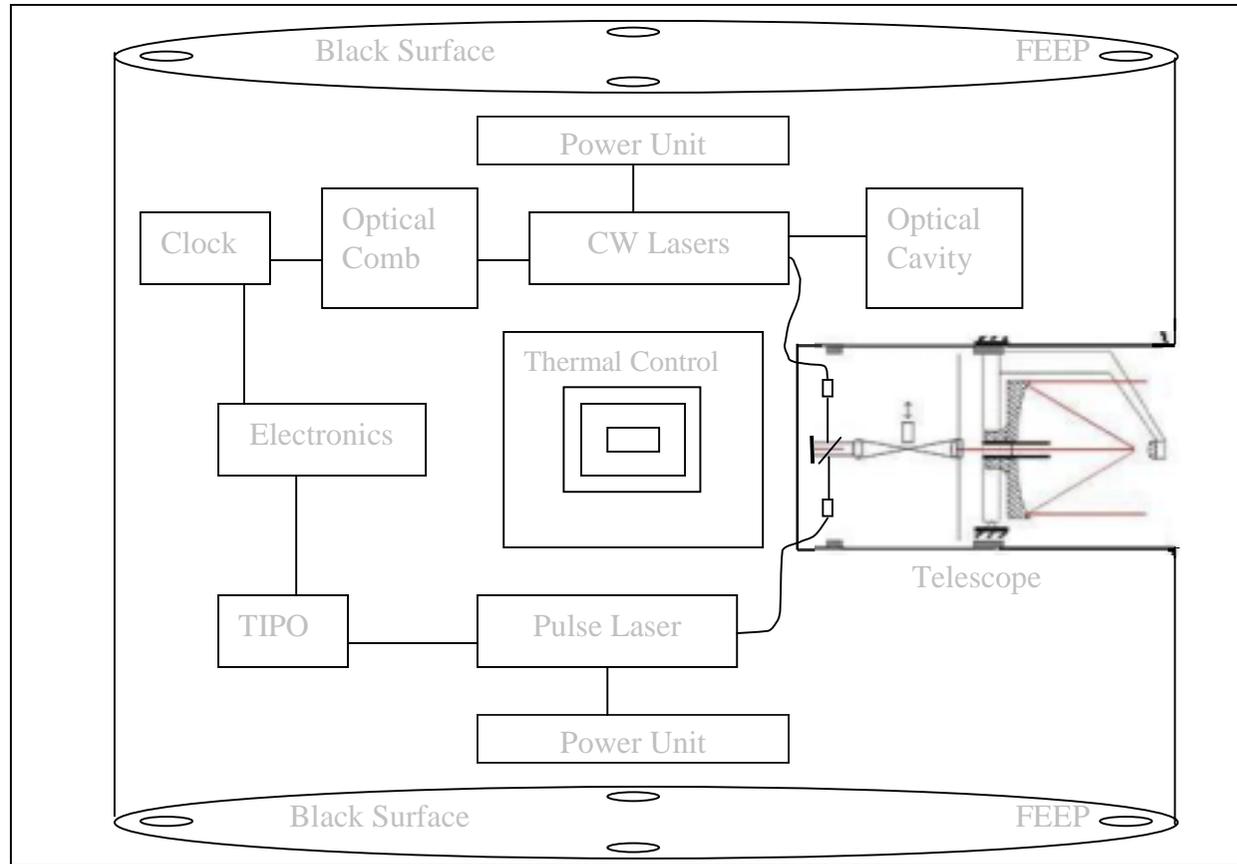
- Concept de la mission
 - » 1 sonde en orbite autour du soleil : 300 jours
 - » 1 station au sol
- Configuration
 - » Télémétrie laser 2 voie : TIPO
 - » Comparaison fréquence laser / Césium
 - » Accéléromètre - Traînée compensée
 - » $10^{-13} \text{ ms}^{-2}\text{Hz}^{-1/2}$ 0.1 mHz - 1 mHz
 - » Filtrage spectral SADOF

 - » *Lien Interférométrique démonstrateur*
- Lancement 2010



Shéma

TIPO 2 voies – ASTROD I



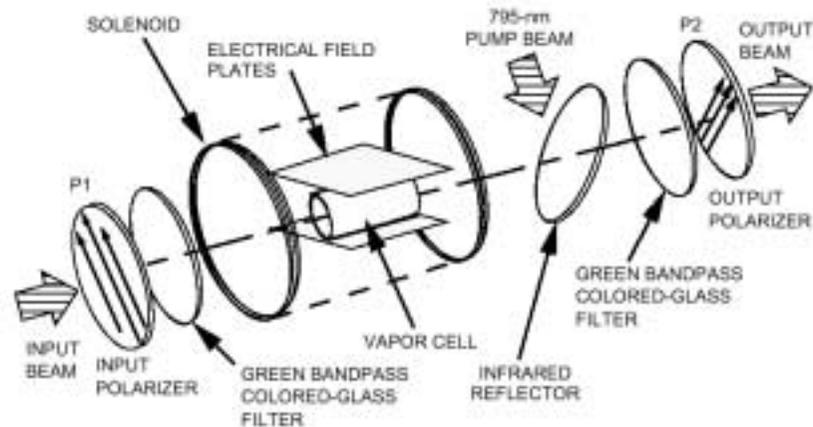
Bilan Masse volume Puissance

TIPO 2 voies – ASTROD I

- Satellite cylindrique de diamètre 2.5m, hauteur 2 m et surface couverte de panneaux solaires
- Orbite : axe cylindre perpendiculaire au plan orbital avec télescope pointant la station laser au sol
- Puissance : 500 W
- Masse totale : 300-350 kg, masse équipement : 100-120 kg.

Observation en conjonction solaire

- Coronographe
- Filtrage spectral : filtre SADOFF : Stark Anomalous Dispersion Optical Filter [Yin et Shay 1994]



Transmission : 80 %

Largeur de bande : 3 GHz

Accord : 200 GHz

- Flux solaire ~ 1 % du flux laser

Objectifs

TIPO 2 voies – ASTROD I

- Détermination des masses d'astéroïdes, \dot{G}/G
 - » Éphéméride, métrique barycentrique [Tang et Ni 2003]
 - 492 astéroïdes ayant un diamètre > 65 km
 - 10 inconnues :
 - Masses Ceres, Pallas et Vesta
 - 6 Densités pour les 489 astéroïdes restants C S M E G U
 - \dot{G}/G
 - » Simulations
 - $\Delta(\dot{G}/G) = 10^{-14} - 10^{-15}$
 - $\delta M/M = 10^{-3} - 10^{-4}$
 - $\delta \rho/\rho = 10^{-2} - 10^{-3}$

Objectifs

TIPO 2 voies – ASTROD I

- Paramètres post Newtonien β , γ , Moment quadrupolaire solaire J_2 [Ni Bao et al. 2003]

- ≈ $\gamma : 4 \cdot 10^{-7}$

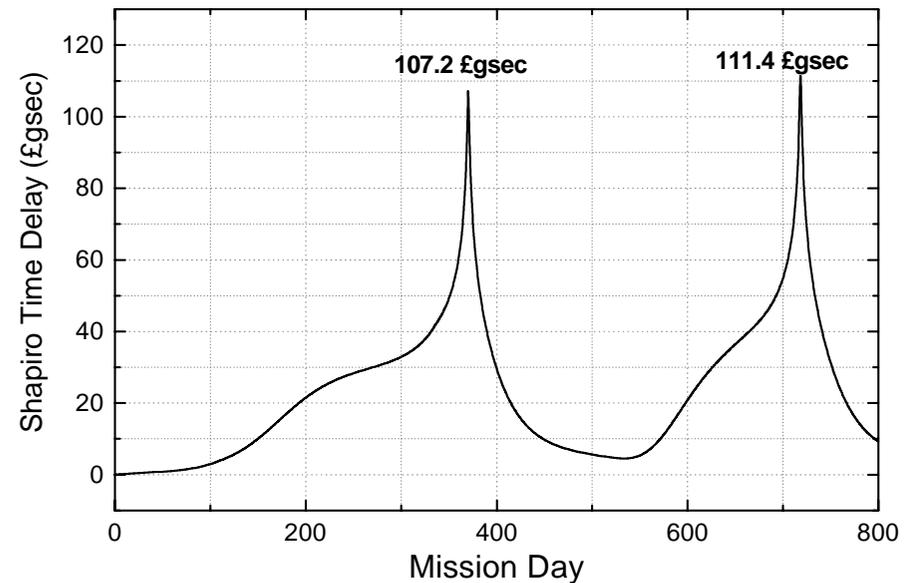
- ≈ $\beta : 4 \cdot 10^{-7}$

- » $J_2 : 10^{-8}$

- $\sigma = 5 \text{ ps}$, $\Delta\Gamma = 10^{-13} \text{ ms}^{-2}\text{Hz}^{-1/2}$

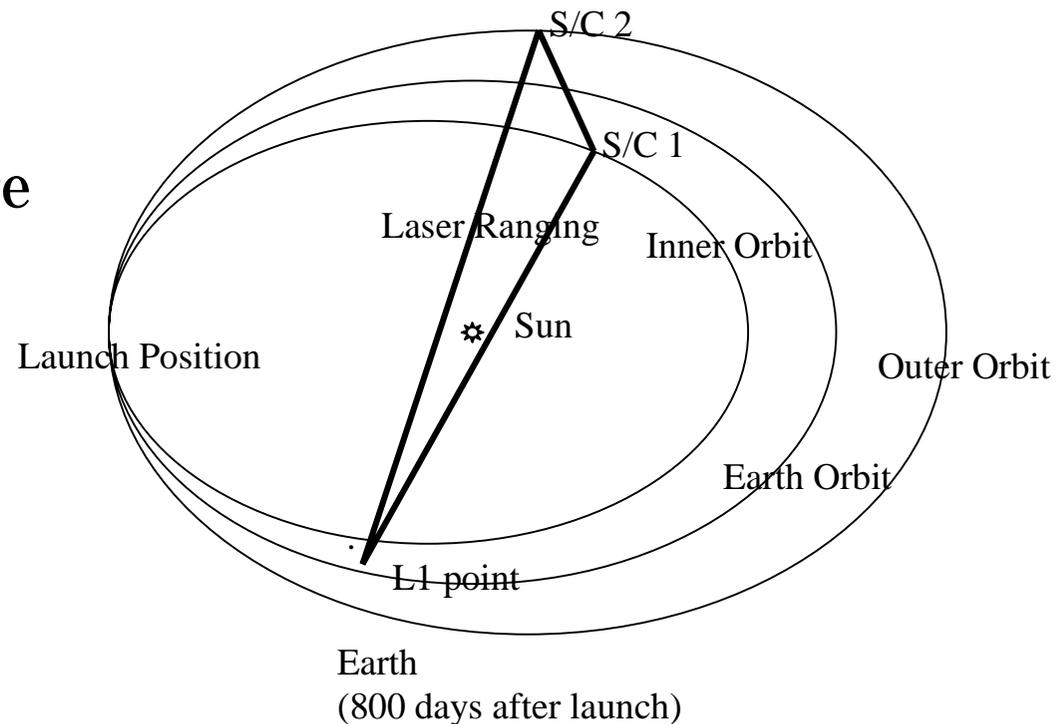
- ≈ $\gamma, \beta : 10^{-8}$

- » $J_2 : 10^{-10}$



*ASTRO*dynamical Space Test of Relativity using Optical Devices

- 3 sondes en orbite solaire, 1 proche de la terre
- Télémétrie laser 2 x 1 voie
- Lien interférométrique entre les trois sondes
- Accéléromètres
- Trainée compensée



ASTROD

- Chaque sonde dispose de :
 - » 2 télescopes de 500 mm pointés en direction des 2 autres sondes
 - » Laser asservi sur le laser incident
- Configuration mesure
 - (T \Rightarrow S1 \Rightarrow S2 \Rightarrow T) - (T \Rightarrow S2 \Rightarrow S1 \Rightarrow T) $\delta t \approx 10$ ms
 - (T \Rightarrow S1 \Rightarrow T \Rightarrow S2 \Rightarrow T) - (T \Rightarrow S2 \Rightarrow T \Rightarrow S1 \Rightarrow T) $\delta t \approx 0.34$ ms
- Largeur de raie ~ 1 Hz
- Bilan de liaison :
 - » Distance : 2 ua $\sim 3 \cdot 10^{11}$ m
 - » Puissance à l'émission 1 W
 - » Puissance reçue : 30 fW

Objectifs ASTROD

- Ondes gravitationnelles

- » Mesure de la différence

$$(T \Rightarrow S1 \Rightarrow T \Rightarrow S2 \Rightarrow T) - (T \Rightarrow S2 \Rightarrow T \Rightarrow S1 \Rightarrow T)$$

- Moment angulaire solaire

- » Mesure de la différence

$$(T \Rightarrow S1 \Rightarrow S2 \Rightarrow T) - (T \Rightarrow S2 \Rightarrow S1 \Rightarrow T)$$

- » Effet Lense-Thirring 50 ps

- » Moment angulaire : 10^{-5}

Extrapolation LISA [Rudiger 2002]

