

## A - Applications de télémétrie laser terrestre :

**A-1** : mesures de métré en construction de bâtiments, et pour l'aménagement de voiries (rond-points, autoroutes)

$$\text{Dist.} = 0,5 \text{ durée\_aller\_retour\_impulsion\_laser} \times c$$

**A-2** : mesures de vitesse par effet Doppler optique (1842) : émission d'une onde monochromatique + réception de la rétrodiffusion du laser (à la longueur d'onde  $\lambda \sim 1 \mu\text{m}$  ; axe orienté de la source à la cible ; et indice\_réfraction  $n \sim 1$ ) :

$$\lambda/n = (c/n) T \Rightarrow (c - V_{em}) \text{ "Tem"} \sim (c - V_{rec}) \text{ "Trec"}$$

$$\Rightarrow V_{\text{cible}} = -0,5 \lambda \Delta f \text{ (où } f : \text{ fréquence\_optique} = 1/T)$$

- application aux mesures vibrométriques =>

- cas des excès de vitesse routiers :

$$V_{\text{cible}} = 250 \text{ km / h} \Rightarrow \Delta f = 277 \text{ GHz} \sim 0,3 \text{ THz} \sim f / 2000$$

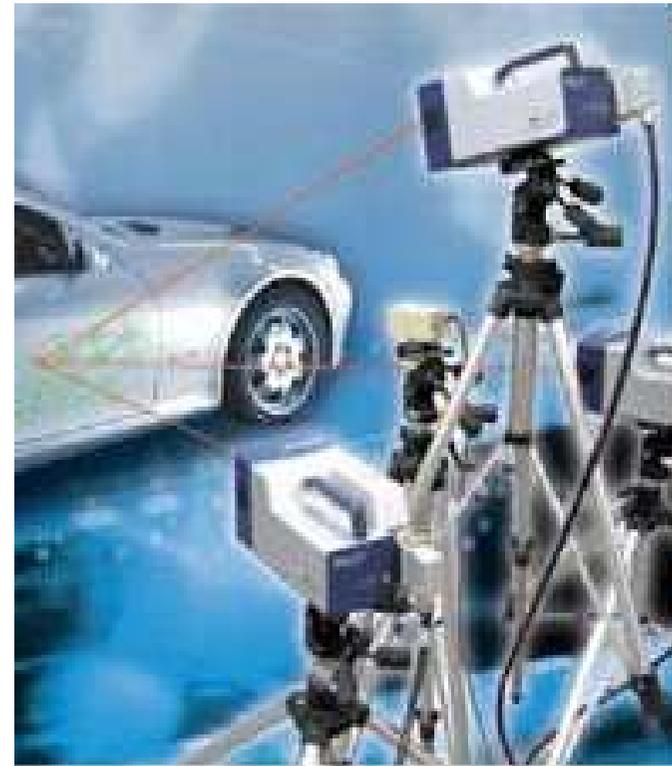
$$\Rightarrow \text{salves de lasers pulsés portant à } 400\text{m} (\sim 10 \times \text{ portée\_radar})$$

**A-3** : mesure de l'écartement de failles en régions sismiques :

- pour la prévention des séismes en zones habitées,

- pour la maintenance des grands ouvrages (barrages, ponts)

=> concurrence des sismomètres piézo-électriques



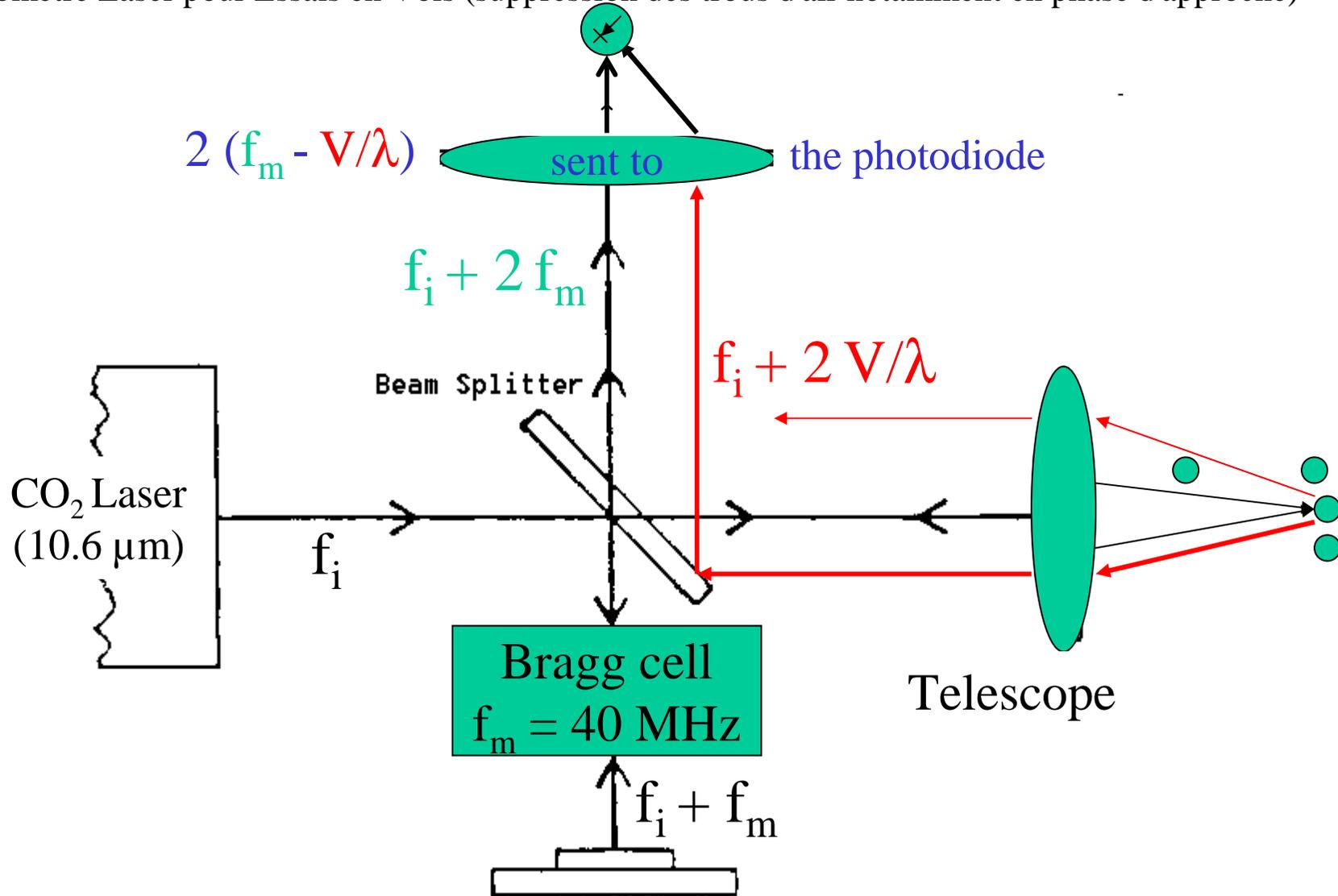
**PSV-400-3D : Vibromètre laser 3D à balayage (Polytec)**

interférométrie avec détection hétérodyne (par cristal AO à 40 MHz) => accès au signe de V.

## B - R&D en télémétrie laser atmosphérique :

B-1 : mesures d'anémométrie laser aéroportée : anémomètre ALEV\_1( / 3 ) de SEXTANT Avionique

Anémomètre Laser pour Essais en Vols (suppression des trous d'air notamment en phase d'approche)



$$\Rightarrow V_{\max} = \lambda f_m \sim 1526 \text{ km / h} = 1,246 \times 1225 \text{ km / h} \sim \text{Mach } 1,25$$

## Analyse spectrale analogique par onde acoustique de surface

=> analyse en 20  $\mu$ s dans la bande de 80 MHz utilisée pour ALEV 1

-----  
Analyses spectrales numériques pour ALEV 3 [cf. PFE ENSICA (1990)] :

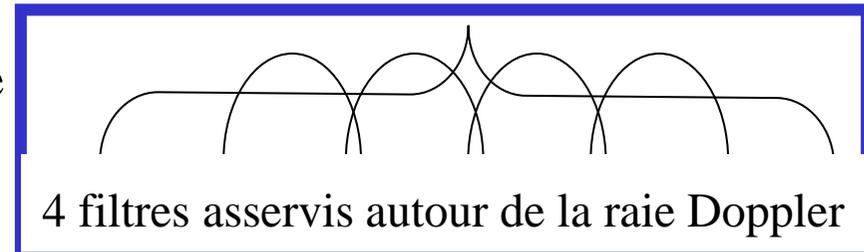
- par l'autocorrélation du signal

[Autocor(0) ; Autocor( $\tau$ ) ; Autocor(2 $\tau$ )]

=> [ Fréquence Doppler ; Puissance du signal ; Puissance du bruit ]

- par transformée de Fourier rapide => peigne de fréquences (FFT)

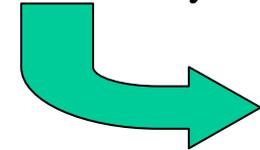
- par filtrage numérique passe-bande  
(méthode dite énergétique   
où chaque filtre couvre 100 kHz  
avec 20 kHz de chevauchement )



Méthodes numériques	Autocorrélation	FFT	Energie
Echantillonnage	7,4 MHz	6,4 MHz	2,2 MHz
RSB mini	0,06	0,1	0,06
Tenue aux accélérations	1,8 g	2,5 g	5,5 g

B-2 : mesures lidar atmosphériques (depuis le sol en visée zénithale de portée ~10 km) des profils des composants de l'atmosphère => classification au **LMD** des nuages traversant le plateau de Saclay.

Centres d'intérêt généraux du **Laboratoire de Météorologie Dynamique**  
*Unité Mixte de Recherche CNRS n° 8539, associée à Paris VI-ENS-Ecole Polytechnique*



**The thin-layer model of intermittent high Reynolds number turbulence -- with applications**

**Julian HUNT** mercredi 13 janvier 2010, à 11h00 Center for Polar Observation and Modelling, University College London

**A non-harmonic wave theory in mid-latitudes on a sphere and recent satellite observations in the ocean** **Nathan PALDOR** jeudi 3 septembre 2009, à 14h00 Fredy and Nadine Herrmann Institute of Earth Sciences The Hebrew University of Jerusalem

**Vers une matrice de covariance d'erreur d'ébauche fortement hétérogène et non-séparable**  
**Olivier PANNEKOUCKE** jeudi 25 juin 2009, à 14h30 Météo-France, Toulouse

**Onsager's Conjecture and Turbulent Dissipation** **Susan FRIEDLANDER** jeudi 18 juin 2009, à 14h30 Department of Mathematics, University of Southern California, Los Angeles

**The Instability of Time-Dependent Baroclinic Shear Flows** **Francis POULIN**  
jeudi 11 juin 2009, à 14h30 Department of Applied Mathematics, University of Waterloo, Canada

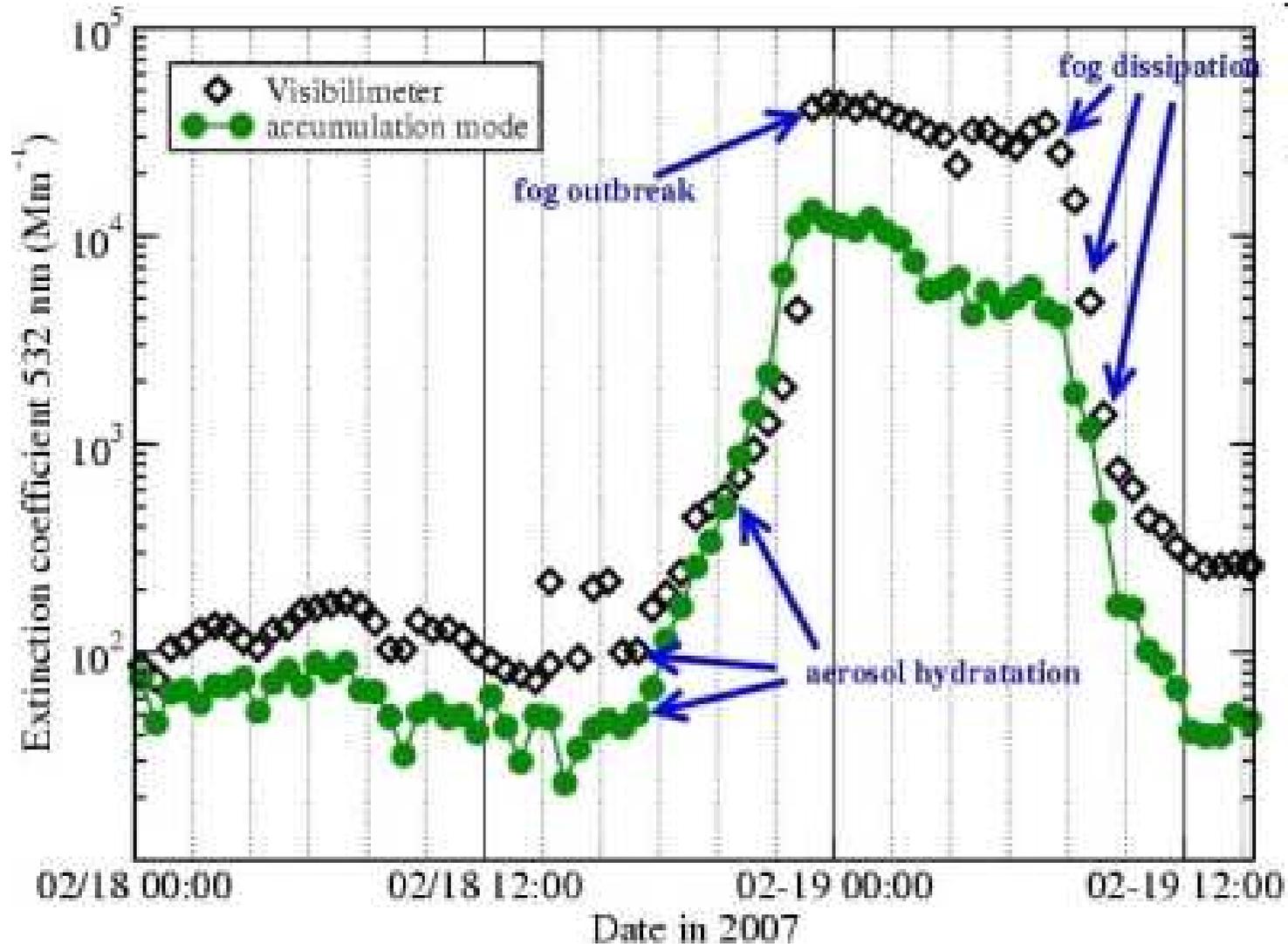
**Vers une théorie de l'Oscillation Nord-Atlantique (NAO)** **Michael GHIL** jeudi 28 mai 2009, à 14h30 Département Terre-Atmosphère Océan, Laboratoire de Météorologie Dynamique, ENS, Paris

# SIRTA Research highlight

*(Site Instrumental de Recherche par Télédétection Atmosphérique)*

Contribution to extinction by accumulation mode particles during the fog life cycle

Thierry Elias, [thierry.elias@lmd.polytechnique](mailto:thierry.elias@lmd.polytechnique)



B-3 : RALI = RAdar + LIdar aéroporté développé par la Division Technique de l'INSU, dévolu à la mesure du profil vertical des composants de l'atmosphère pour passer des mesures nuageuses 2D faites par les satellites météorologiques (Meteosat) à des analyses en 3D de ces phénomènes.

- Avantages : mesures là où il y a des phénomènes intéressants à étudier

=> explorations de zones orageuses par coupes verticales de 20 km

par visées (zénithales + "nadir") avec un ATR / Falcon en pallier à 10 km,

=> mesures et modélisation possibles de la mousson africaine,

=> mesures de l'abondances d'aérosols et de polluants,

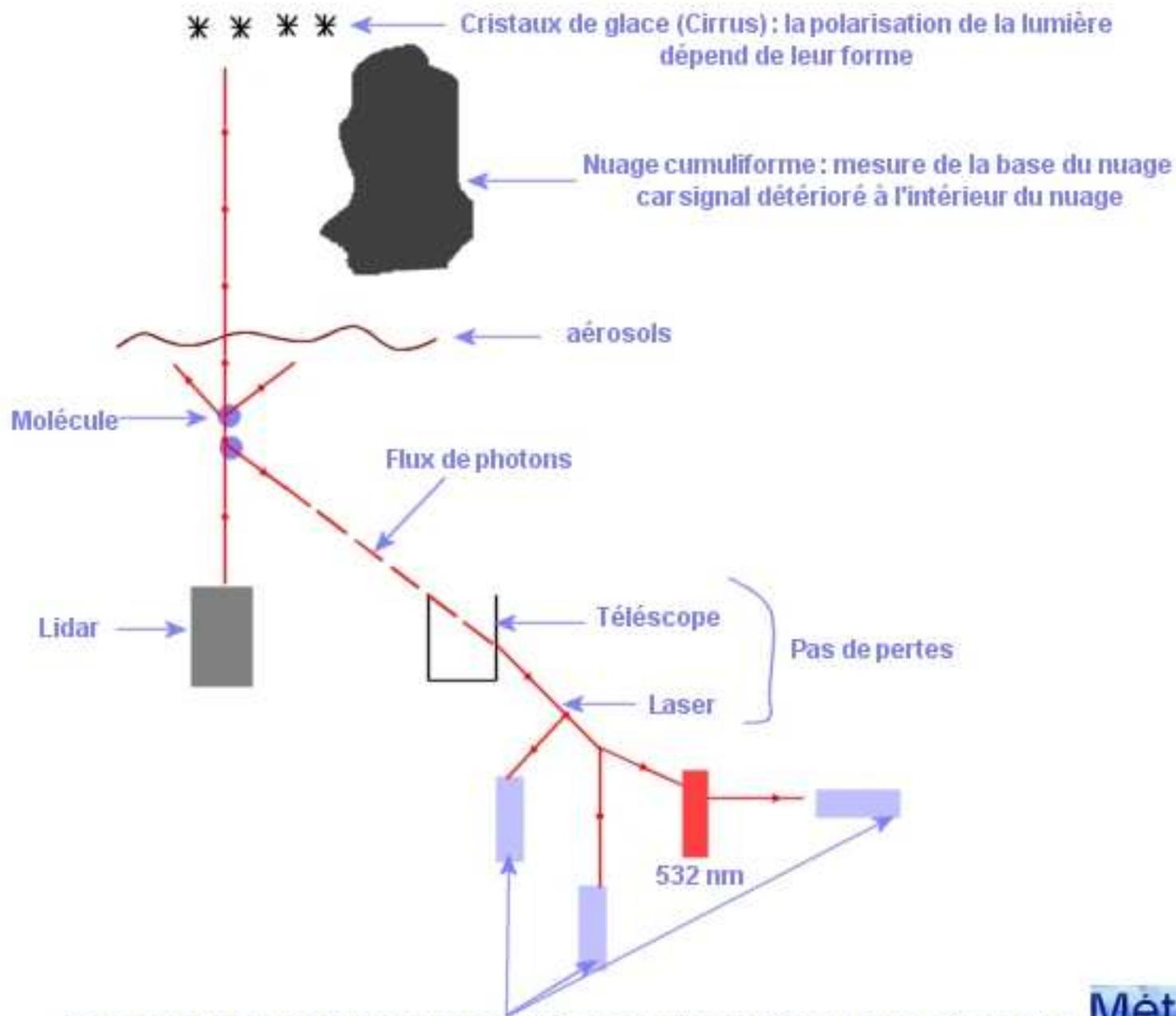
+ accès à une meilleure modélisation de leurs migrations,

=> améliorations escomptées des prévisions météorologiques

à moyen terme et prédictions sur l'avenir de notre atmosphère...

- Inconvénient : cout\_avion (B-3) = cout\_terrestre (B-2) x 10

## Fonctionnement d'un lidar



Détecteurs ; 2 étages de mesures sont pris en compte aboutissant donc à 6 mesures

# Airborne Lidar LEANDRE II for Water-Vapor Profiling in the Troposphere. I.

## System description

Didier Bruneau, Philippe Quaglia, Cyrille Flamant, Mireille Meissonnier, and Jacques Pelon

Applied Optics, Vol. 40, Issue 21, pp. 3450-3461      doi:10.1364/AO.40.003450

## Abstract

The airborne differential absorption lidar LEANDRE II, developed for profiling tropospheric water-vapor mixing ratios, is described. The emitter is a flash-lamp-pumped alexandrite laser, which operates in a double-pulse, dual-wavelength mode in the 727–736 nm spectral domain. Two 50-mJ successive on-line and off-line pulses with an output linewidth of  $2.4 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$  and a spectral purity larger than 99.99% are emitted at a 50- $\mu\text{s}$  time interval. The spectral positioning is controlled in real time by a wavemeter with an absolute accuracy of  $5 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ . The receiver is a 30-cm aperture telescope with a 3.5-mrad field of view and a 1-nm filter bandwidth. These instrument characteristics are defined for measuring the water-vapor mixing ratio with an accuracy better than  $0.5 \text{ g kg}^{-1}$  in the first 5 km of the atmosphere with a range resolution of 300 m, integration on 100 shots, and an instrumental systematic error of less than 2%. The sensitivity study and first results are presented in part II [Appl. Opt. 40, 3462–3475 (2001)]. © 2001 Optical Society of America

Pour les lasers **impulsionnels**, on ajoute des modules détériorant la cavité, pour obtenir des impulsions de quelques pico-secondes émises à une cadence allant de 10 à 1000 Hz

=> obtention de puissances crêtes de 1 GW, permettant de mesurer que la Lune (~400 000 km) s'éloigne annuellement de 4 +/-1cm. Cette **distance est mesurée à +/-1 mm** en 10 mn (point normal ILRS=6000 tirs)



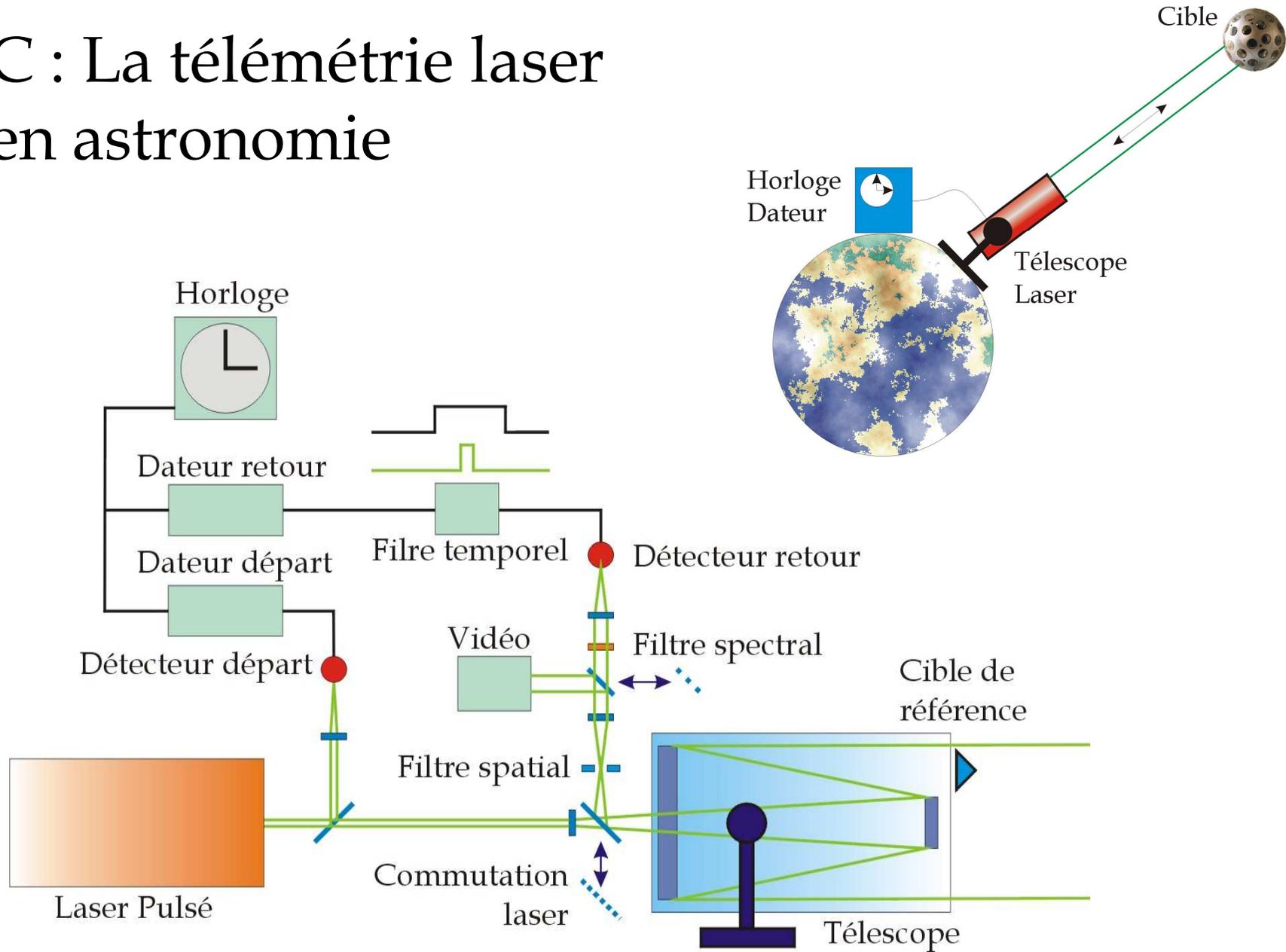
Premières  
mesures laser  
de 1970  
à +/- 15 cm



Mesures radar  
Au km près



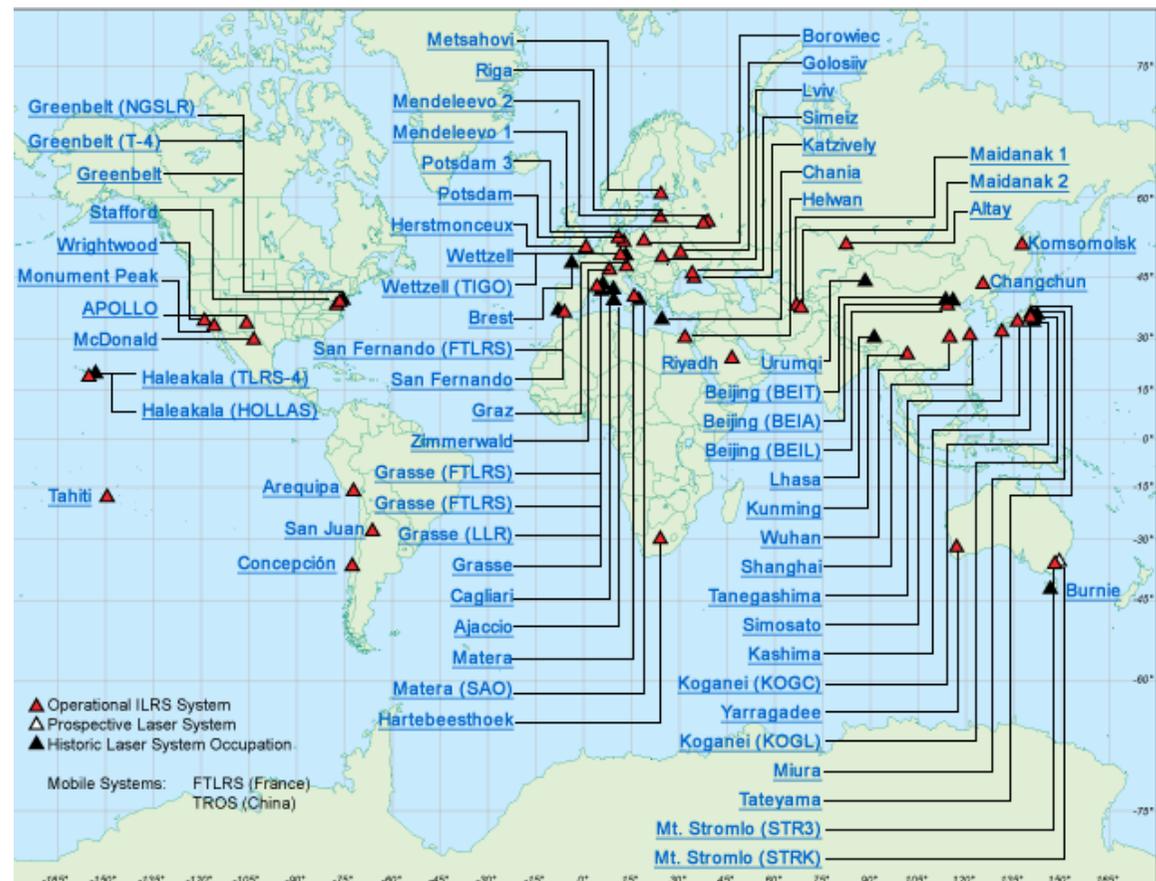
# C : La télémétrie laser en astronomie



## C-1 : mesures des déformations du géoïde par la "géodésie spatiale"

=> mesures des élévations et affaissements des plaques tectoniques par la combinaisons de télémétries laser satellitaires avec des mesures GPS/Galiléo (réseau ILRS coordonnant les observations d'une quarantaine de stations-sol).

=> passage de la précision métrique à la précision sub-centimétrique

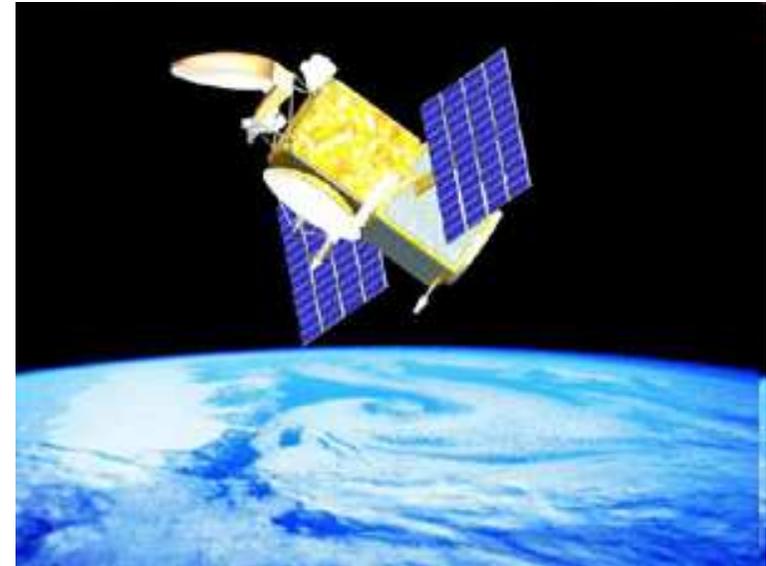


## B-4 : satellites océanographiques JASON I et II (avec T2L2 pour l'astronomie).

Ils ont pour mission principale l'étude du niveau des mers en local (courants chauds) et la mesure de l'élévation du niveau des mers à l'échelle mondiale (problématique du réchauffement climatique)

- Avantage : surveillance de l'ensemble des mers (vagues scélérates)

- Inconvénient :  $\text{cout\_spatial (C)} = \text{cout\_terrestre} \times 100$



The Time Transfer by Laser Link (T2L2) payload, initially planned to be embarked on MIR in 1999, then with the ACES mission on the ISS, has recently been accepted by the French space agency CNES as a passenger of the Jason-2 altimetry satellite. T2L2 on Jason-2 will allow the precise characterization of the USO (ultra-stable oscillator) used by the DORIS positioning system. Relying on this clock, T2L2 may also be able to perform some orbit restitutions of Jason-2 uniquely by one-way laser ranging. Jason-2 represents an excellent opportunity as its high altitude allows for time transfer with very long integration times in common view mode for most of the continental links. [http://ilrs.gsfc.nasa.gov/satellite\\_missions/list\\_of\\_satellites/jas2\\_general.html](http://ilrs.gsfc.nasa.gov/satellite_missions/list_of_satellites/jas2_general.html)

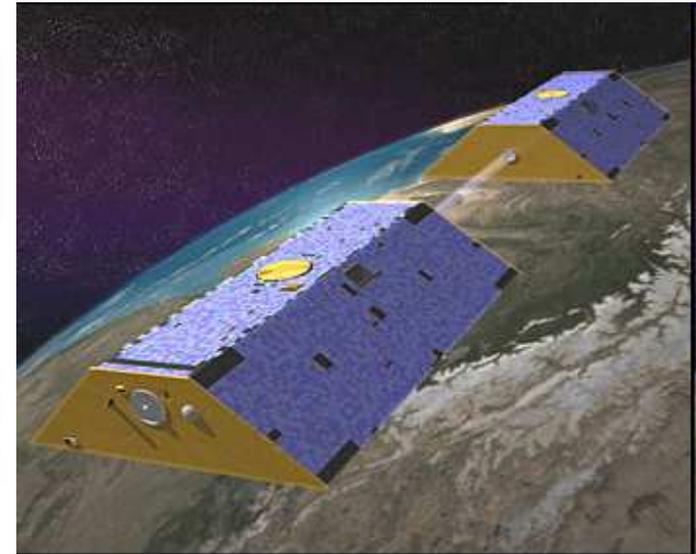
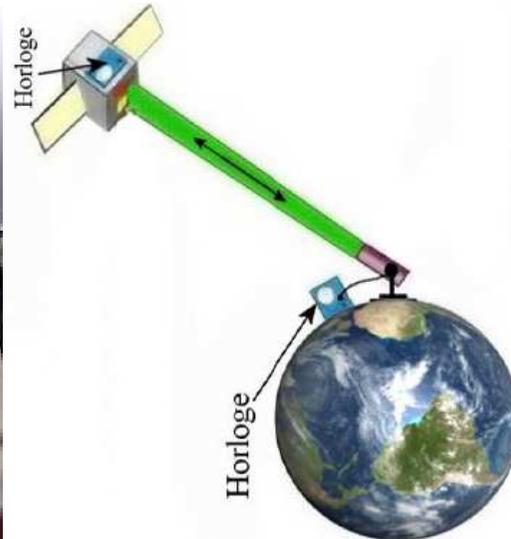
## C-2 : mesures T2L2 pour une mise en phase des horloges terrestres

=> gain scientifique déterminant en métrologie de l'espace et du temps

+ accès à un pré-pointage automatisé pour les cibles astronomiques

<= par l'accès aux mouvements de l'axe pôle sud - pôle nord

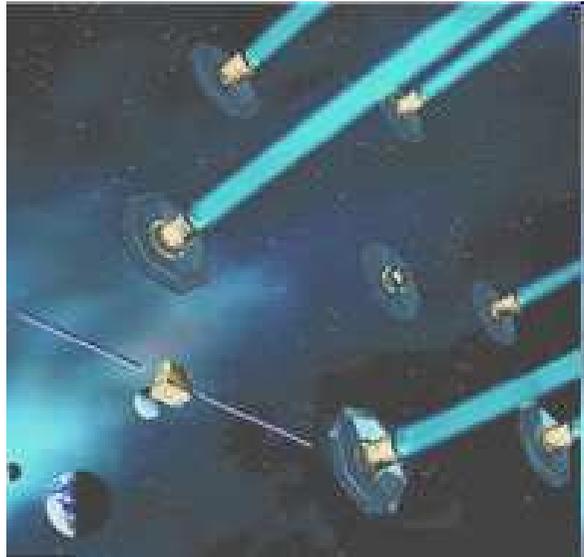
<= par l'accès aux irrégularités de la rotation de la terre sur elle-même.



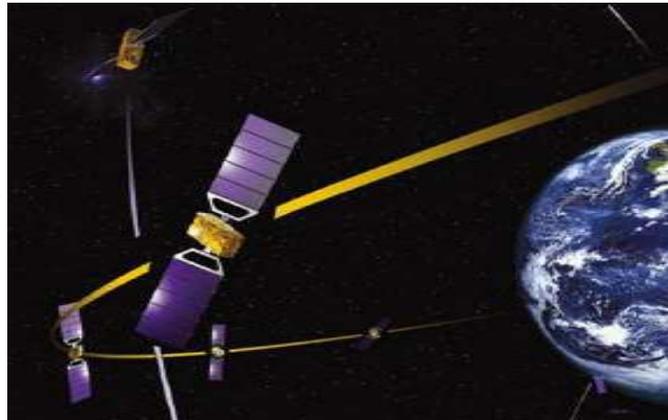
C-3 : missions Grace / Goce : elles sondent la gravité locale avec 2 satellites qui se suivent avec des accéléromètres hypersensibles embarqués (dont on doit connaître précisément la position pour pouvoir localiser les champs de gravité mesurés).

+ évocation de VIRGO, de MICROSCOPE, de LISA et de l'anomalie Pioneer...

C-4 : DARWIN/TPF et autres projets connexes nécessitant des flottilles de satellites coordonnés pour augmenter la portée et la sensibilité des missions spatiales comme cela se fait au sol ( Keck + VLTI avec des lignes à retard )

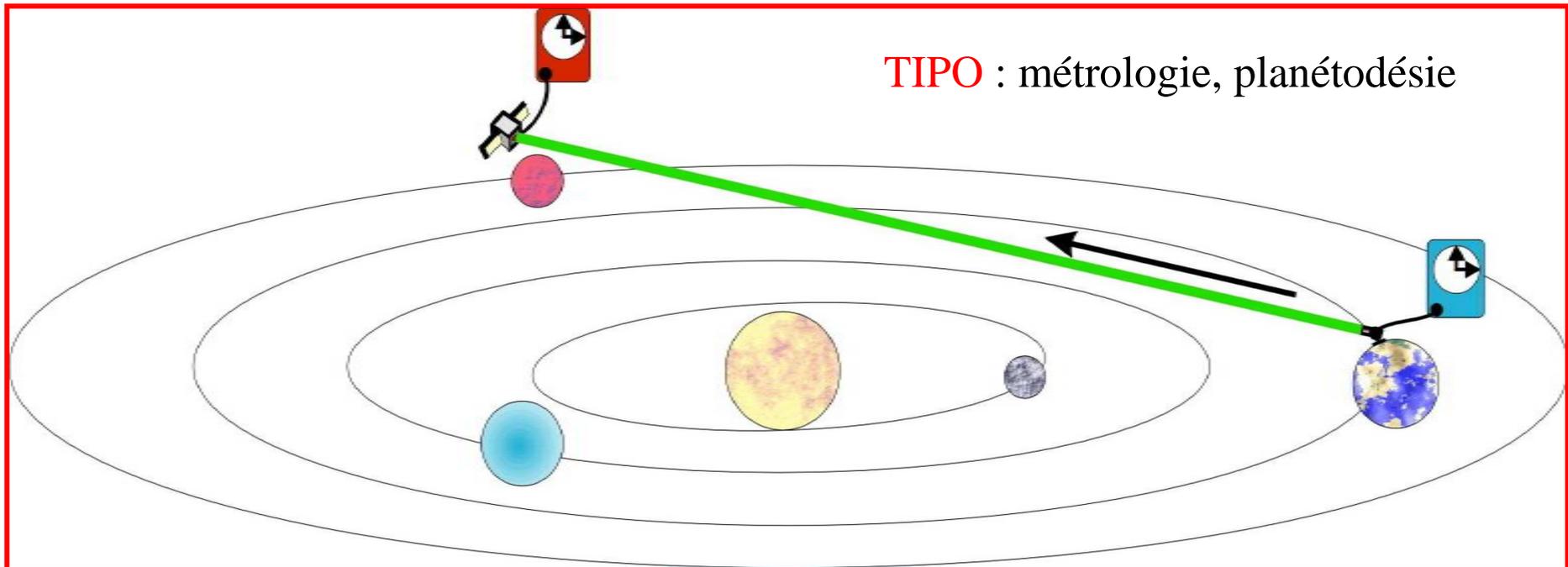
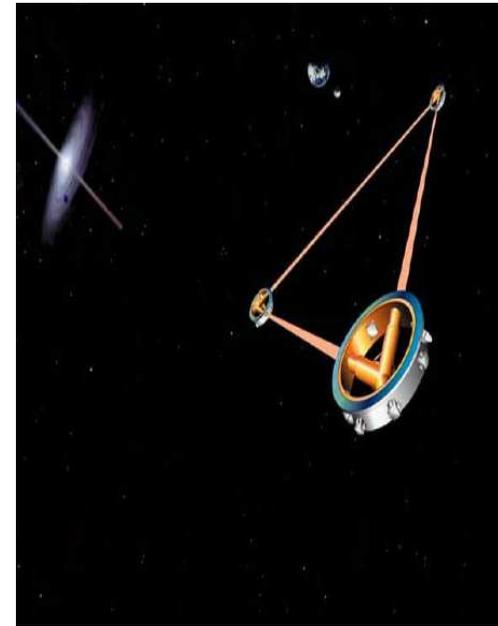


# Projets complémentaires liés à la télémétrie laser



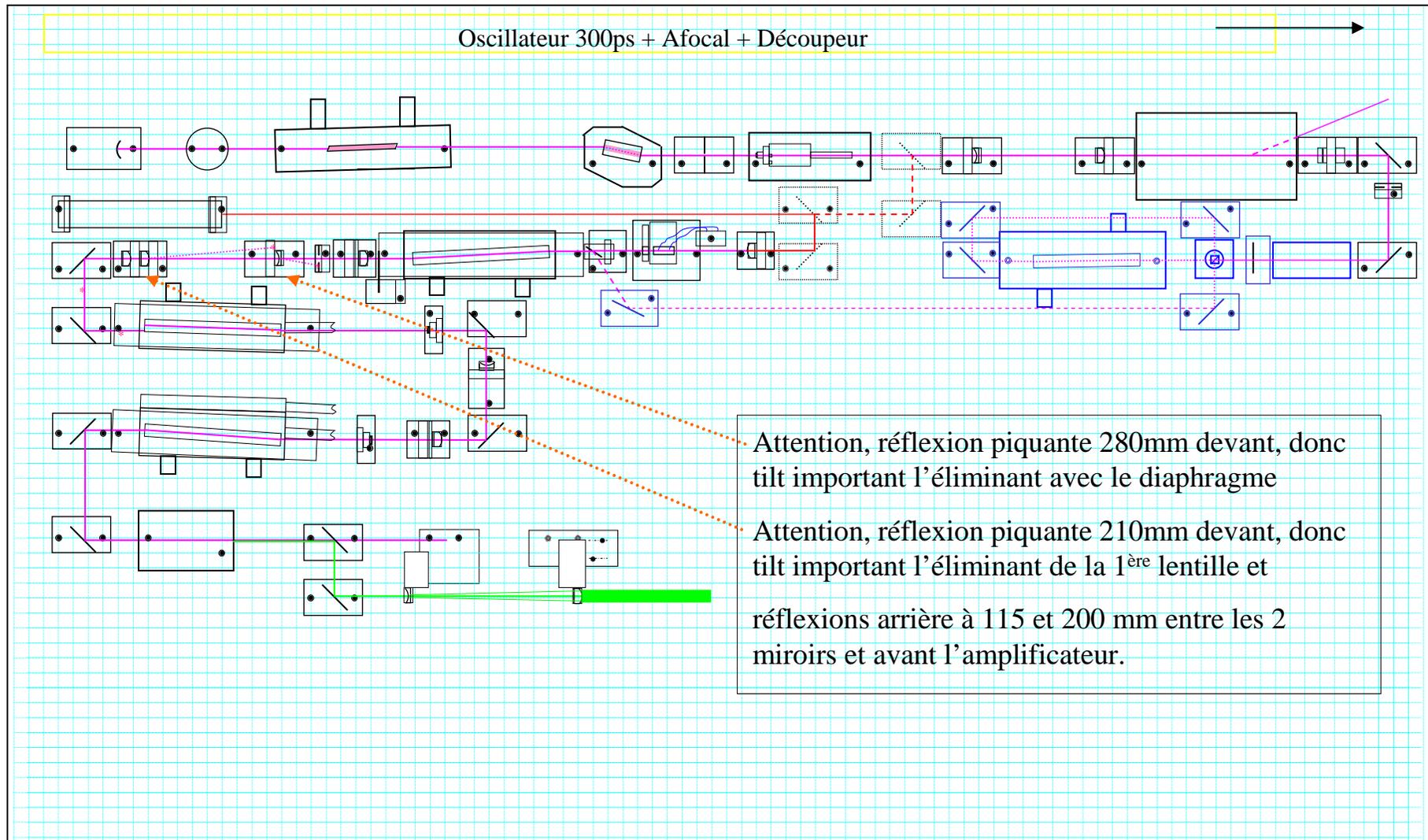
Galiléo 2008-2012 : positionnement

LISA 2014-2020  
Time Delay  
Interferometry

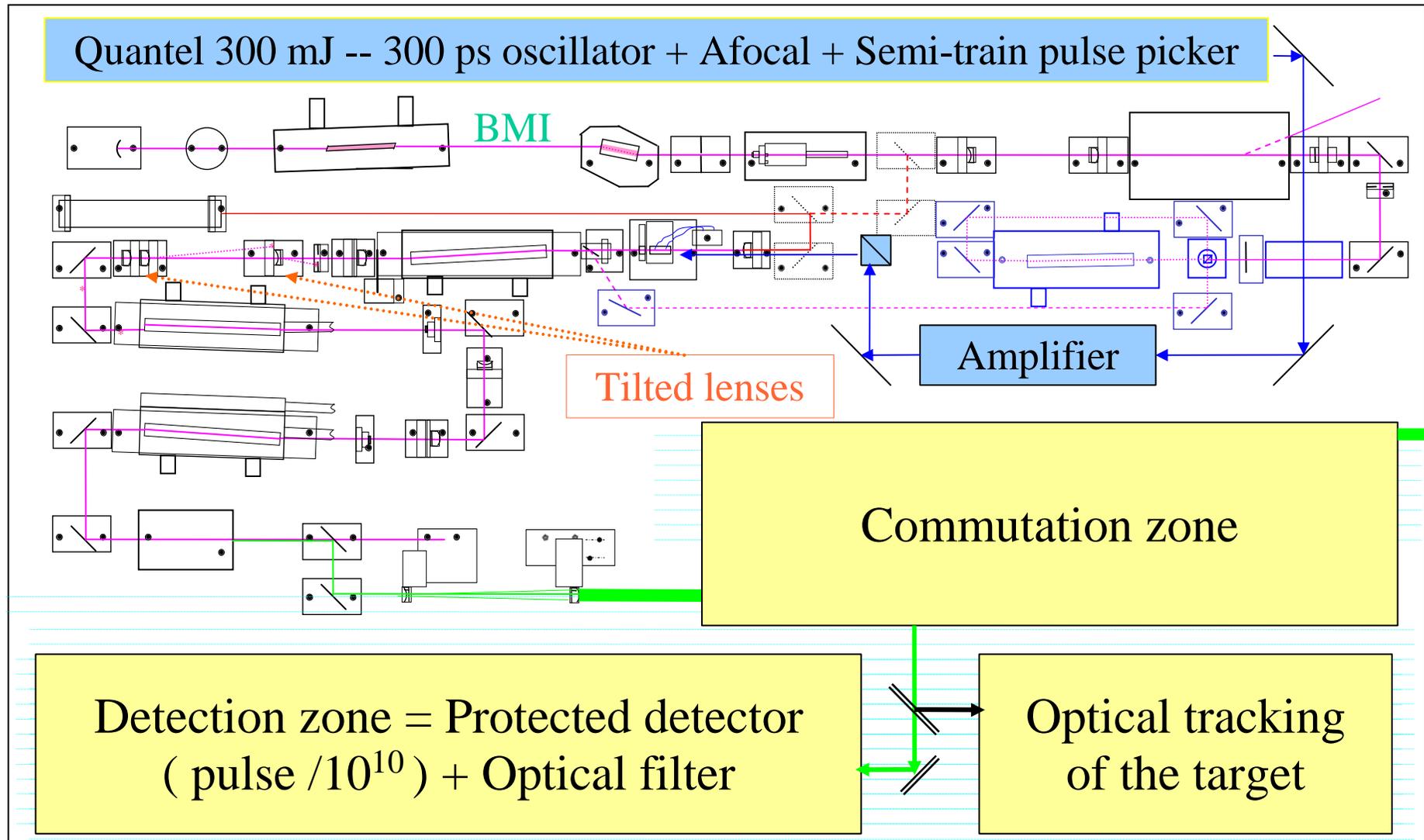


TIPO : métrologie, planétopédie

# Table de l'expérience télémétrie – Laser Méo en 2004



2007 MéO lasers = Quantel Lunar laser + precise BMI (50 mJ -- 20 ps) dye laser



scale ~ 1/10

G. Martinot-Lagarde... ILRS Fall 2007 AWG Meeting, Grasse, France, 25-28 sept.

Difficulty of dye cell maintenance

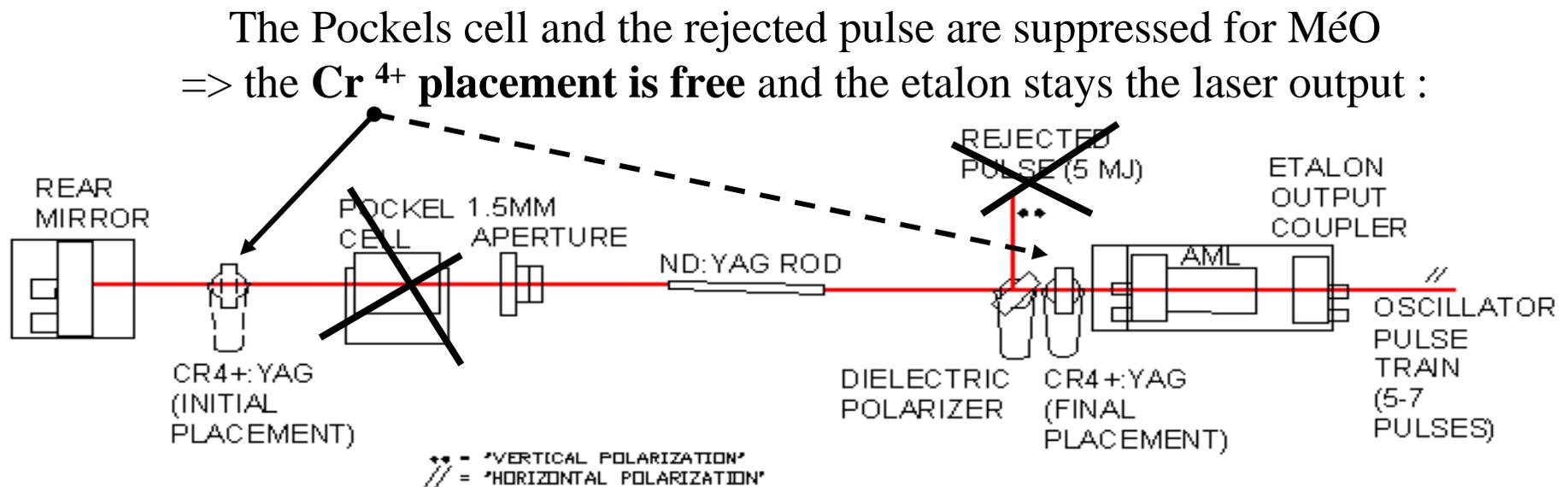
+

Difficulty to superimpose the lasers  
in the 3 common amplifiers rods :

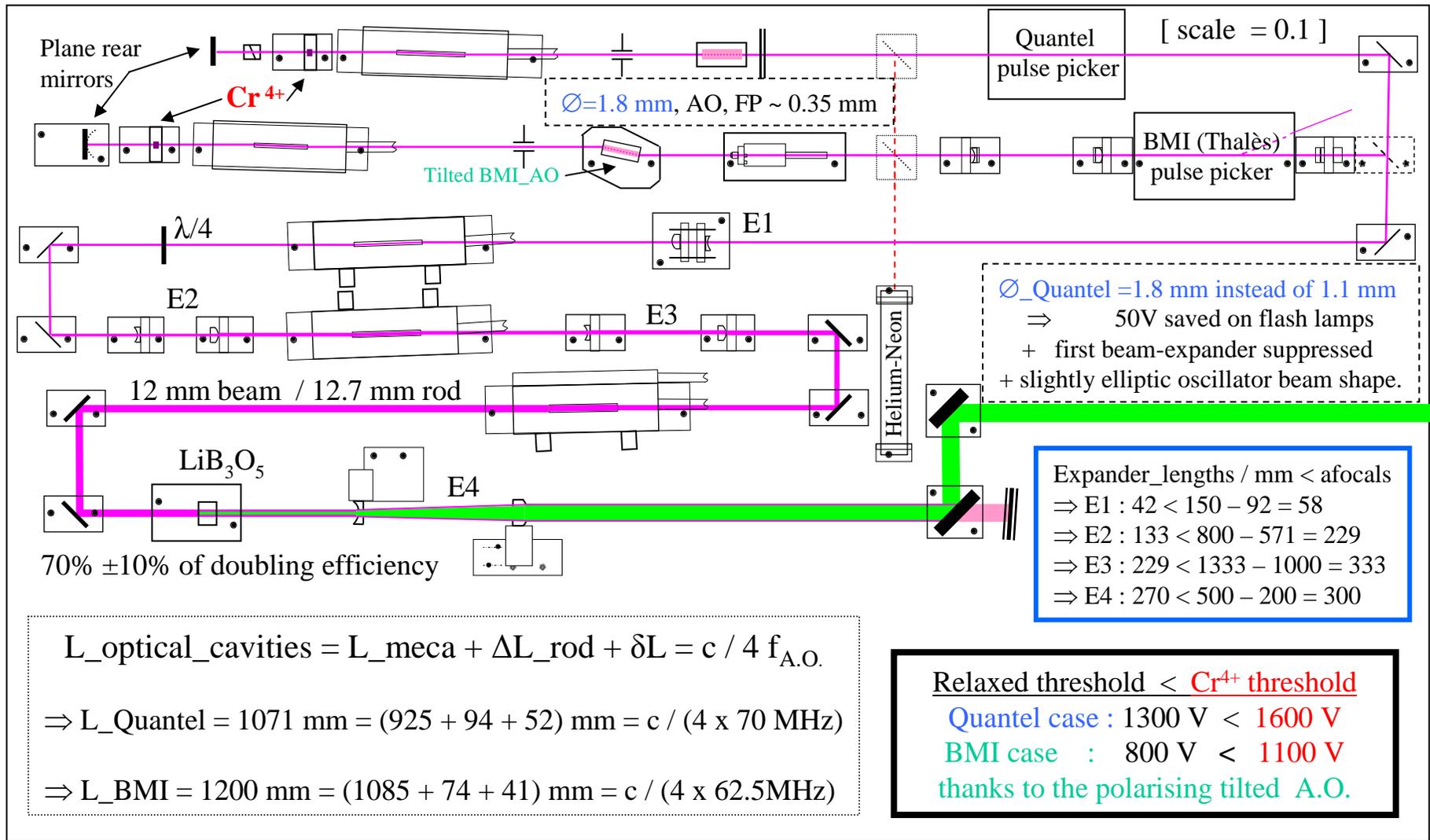
=> Unique laser wanted with a tunable pulse energy [ 50 mJ ; 200 mJ ].

=> Intermediate (150 ps) pulse duration obtained at 532 nm (and 10 Hz)  
with a modified Quantel oscillator (simplified / 2008 Moblas version)

=> Then, the BMI (Thalès) oscillator becomes a R&D oscillator...

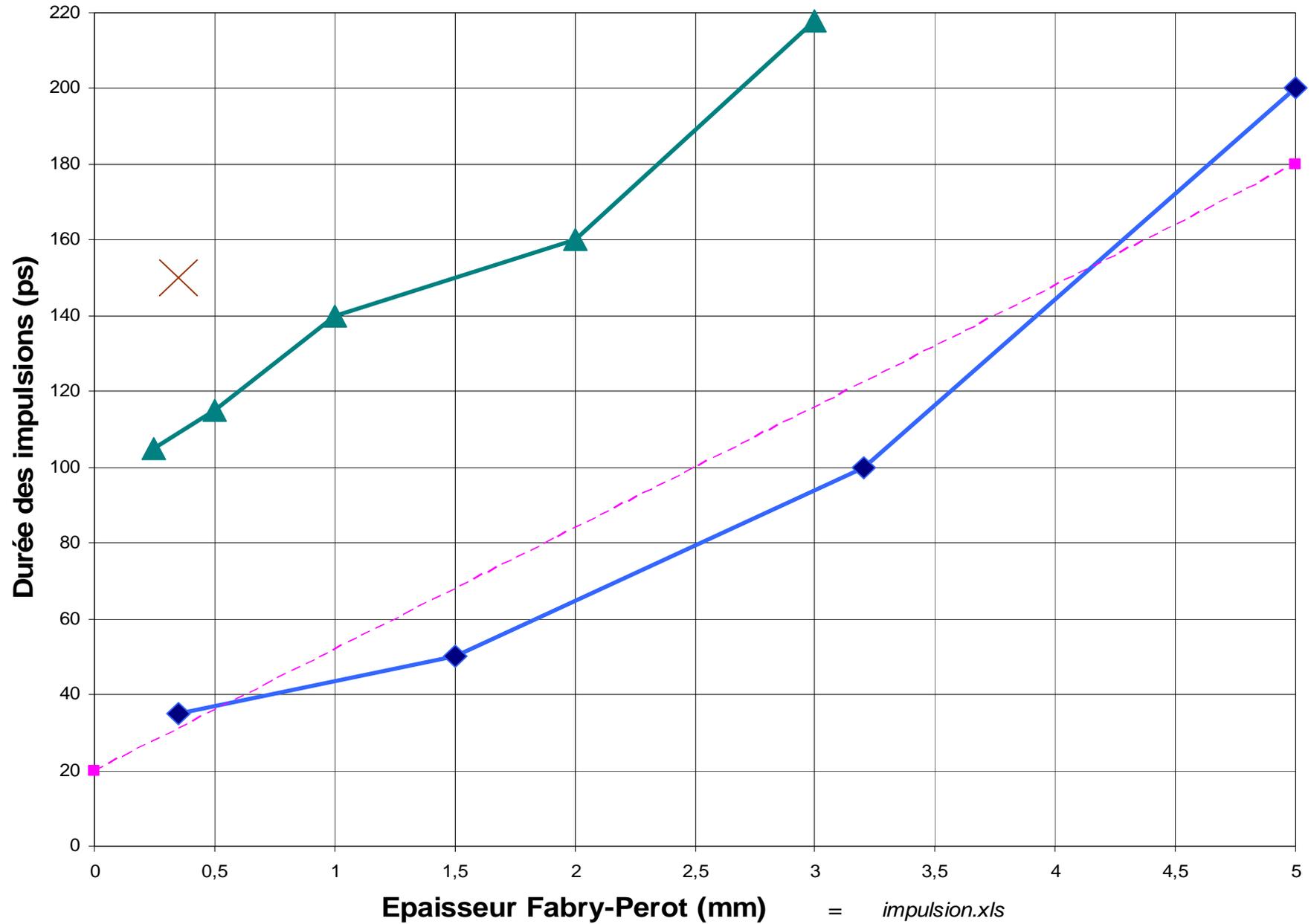


2012 MéO lasers set-up (on a 2400 x 1400 mm<sup>2</sup> optical table) by G. Martinot-Lagarde

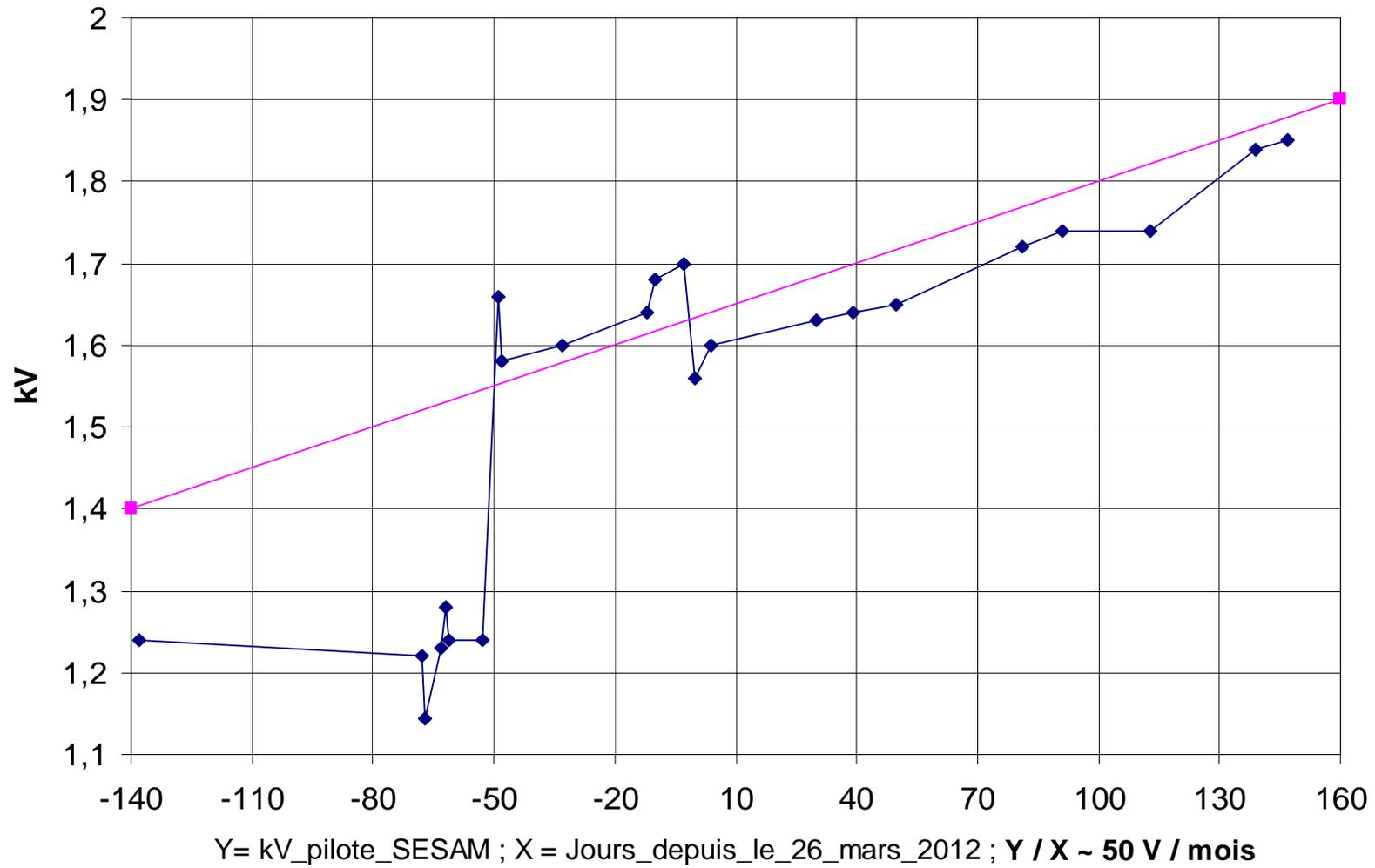


- ⇒ Uniform circular beam emitted at 10 Hz with stable pointing, energy and pulse duration (~150 ps)
- ⇒ Satellite Laser Ranging performed with 100 mJ<sub>532 nm</sub> / 140 mJ<sub>IR</sub> (instead of 50 mJ<sub>532 nm</sub> with the dye)
- ⇒ Lunar Laser Ranging accessible during the day with 170\_210 mJ<sub>532 nm</sub> / 210\_260 mJ<sub>IR</sub> (with delay tuning).

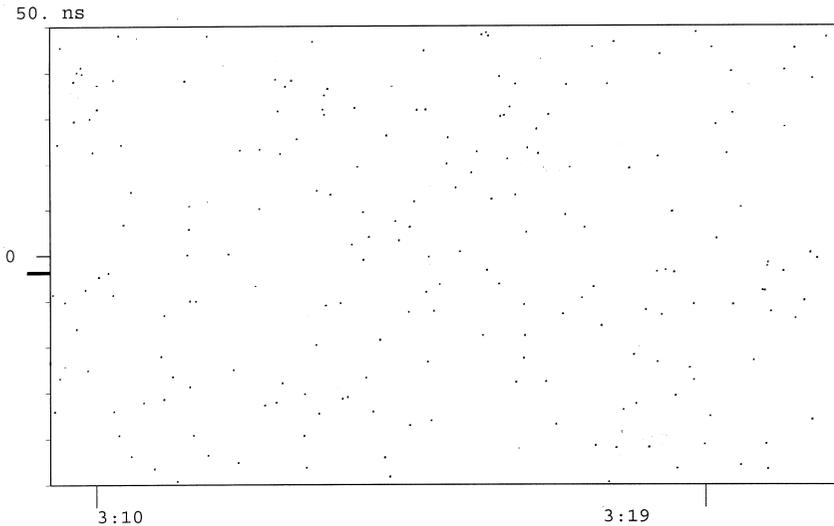
Impulsions " QUANTEL + dye " < " Moblas " < X = " SESAM Méo "



Y(-138 + nouveaux flashes et nouvelle alimentation qui chauffe),  
Y(-67 à FP=100 ps => lasage facilité), **Y(-62 à froid à FP=35ps)**,  
Y(-48 ; redresseur changé), y(0 ; flashes rechangés) = "*Flash\_pilote2012.xls*"



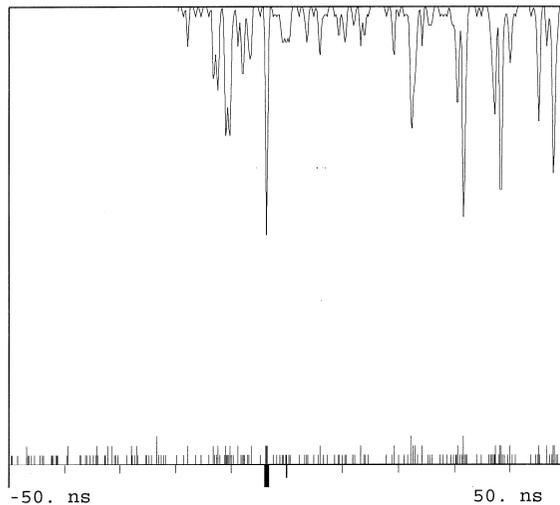
14/ 6/ 2012 - 3: 9 - Apollo 15 - série c:\llr\brutlune\12061403.09u  
temp = 8.77 pre = 874.16 hum = 55.03



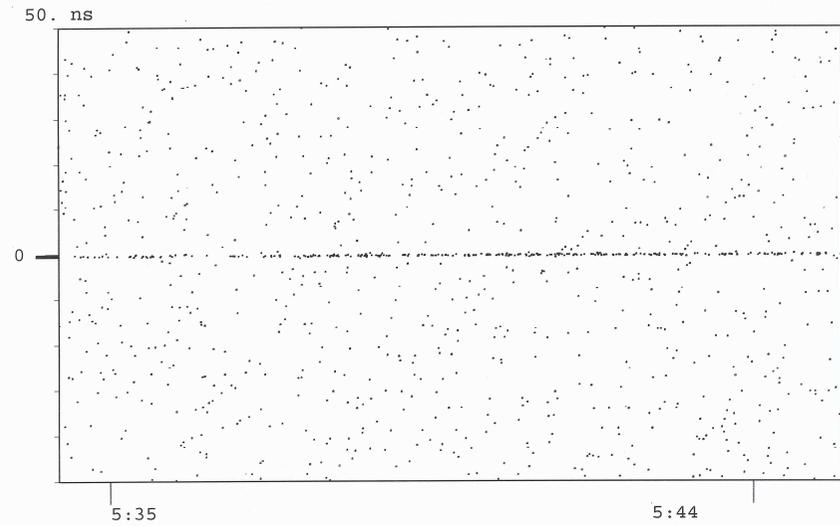
Calibration  
nb (1er pic) : 293  
moyenne : 76.300 ns  
écart-type : 0.079 ns

Résultats  
R = 3.39  
n = 6  
rés. = -3.495 ns  
sigma = 0.207 ns  
rapport S/B = 4.25

*le rapport signal sur bruit  
devrait être supérieur à 10  
pour pouvoir être intéressant*

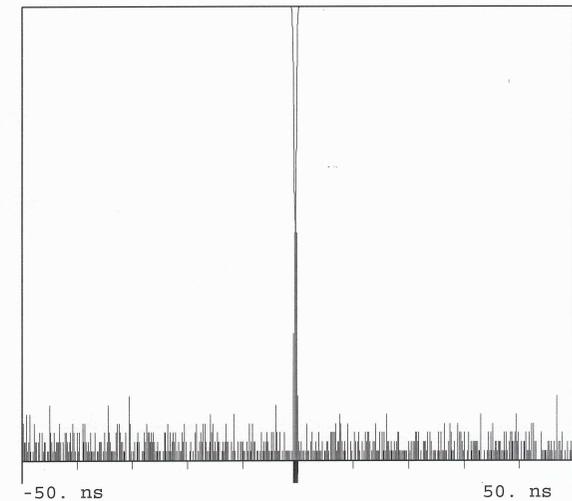


7/ 9/ 2012 - 5: 34 - Apollo 15 - série c:\llr\brutlune\12090705.34u  
temp = 16.05 pre = 881.77 hum = 57.99



Calibration  
nb (1er pic) : 572  
moyenne : 76.330 ns  
écart-type : 0.069 ns

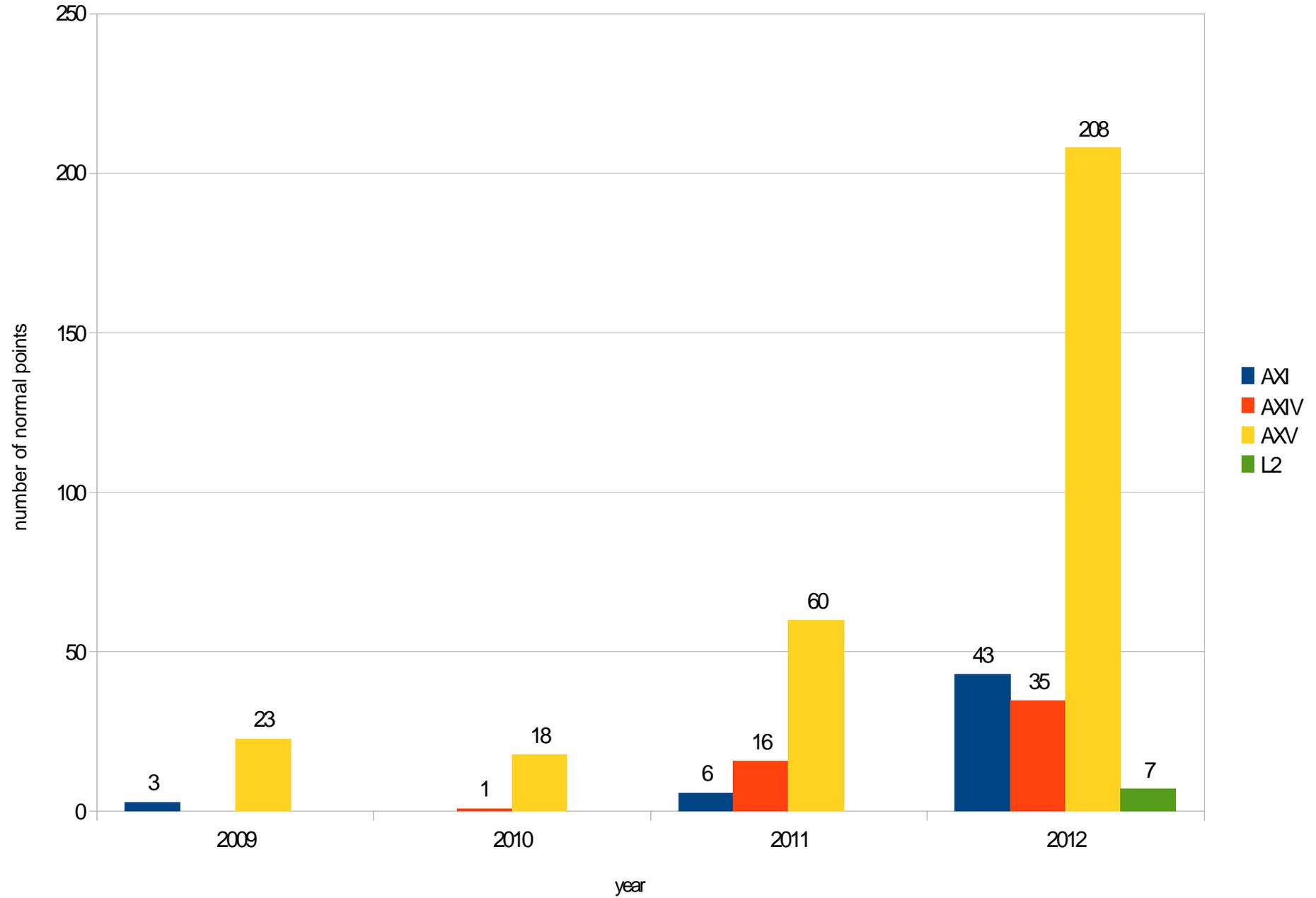
Résultats  
R = 39.65  
n = 283  
rés. = -0.347 ns  
sigma = 0.174 ns  
rapport S/B = 26.677



« AVANT » : nuit voilée ou ventée...

« APRES » : Lune haute, peu éclairée.

# Normal points per reflector



# Conclusion = apport de la télémétrie laser spécifique à l'astronomie

Aide au passage d'une astronomie angulaire (étoiles punaisées sur la voute céleste formant des constellations d'étoiles occupant la même zone angulaire) à une astronomie qui commence à avoir accès à la profondeur ("3D").

=> application = télémétrie terre-lune (*expertise = OCA \ Géoazur \ Calern*).

+ sélénophysique + test du Principe d'Equivalence par T2L2 (et Microscope)

Rappel de la mesure d'Hipparque de la distance Terre-Lune par la méthode des éclipses de Soleil (S) et de Lune(L) (S, L sont les durées mises par le centre de la Lune pour traverser le cône solaire) :

Angle\_Lune ~ Angle\_Soleil  
 $\Rightarrow V_{Lune} = \varnothing_{Lune} / S$

Or  $V_{Lune} = \varnothing_{Terre} / (S + L)$  \*  
 L'expérience donne  $L / S \sim 2,5$   
 $\Rightarrow \varnothing_{Terre} = (1 + 2,5) \varnothing_{Lune}$   
 Angle\_Lune ~ 0,52 degrés  
 $\Rightarrow \text{Dist.} \sim R_{Terre} / (3,5 \sin 0,26^\circ)$   
 $\Rightarrow \text{Dist. Terre-Lune} \sim 400\,000 \text{ km}$

Autres forces

$\Sigma F = m \, dv/dt$

$P = m_{grave} \, g$

$m = m_{grave} ?$