

# **Bancs pour la caractérisation de la lumière diffusée**

Workshop ET France

1/04/26

*F. Cleva au nom des groupes:*

- ARTEMIS (Observatoire Côte d'Azur, Nice)
- Institut FRESNEL (Marseille)
- Laboratoire d'Annecy Physique des Particules (Annecy)
- Laboratoire des Matériaux Avancés (Lyon)

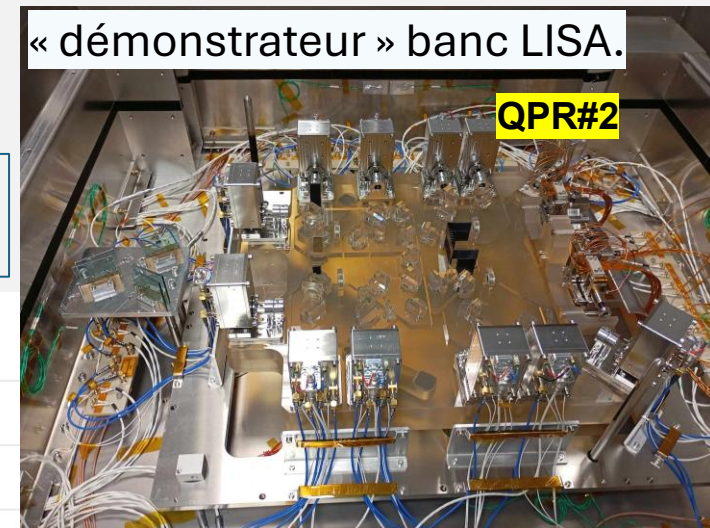
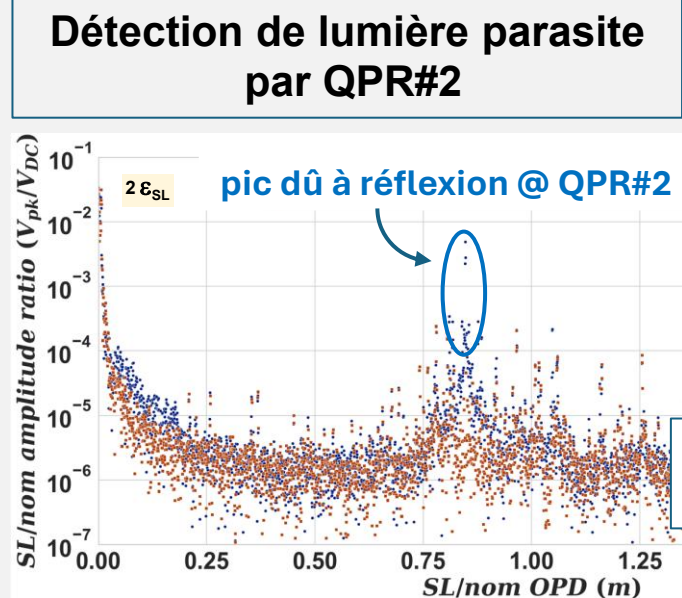
## □ SLOGSE, StrayLight Optical Ground System Equipement (M. Lintz, M. Nardello, A. Roubeau-Tissot)

Banc de métrologie de la lumière parasite dans les bancs de **LISA** (mandat ESA/CNES)

Mesure de niveau système pour identifier composants resp. de lumière parasite

### Spécifications

- Plancher  $< 10^{-12}$  (rel.) lumière parasite recouplée dans l'itf LISA
- Résolution  $\sim 1$  mm

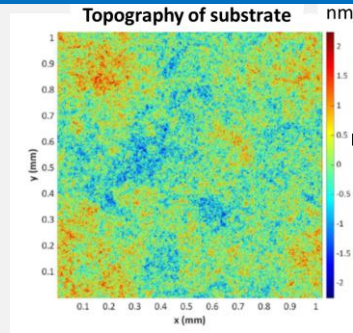


QPR#2 masquée  
QPR#2 non masquée

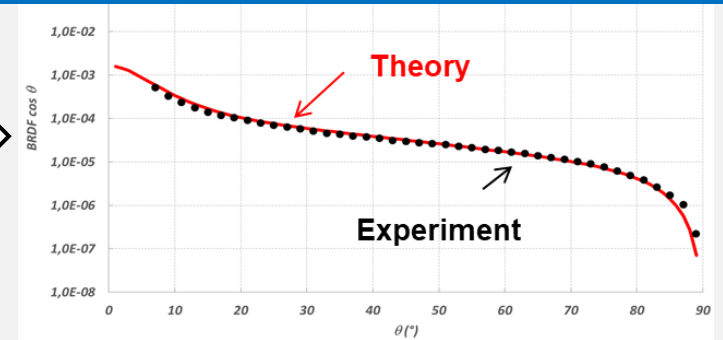
## □ SLS\_Id, StrayLight Source Identifier

Inspiré du SLOGSE, adapté pour Virgo

## Straylight & components: BSDF



structure:  
Design, Thickness, index...

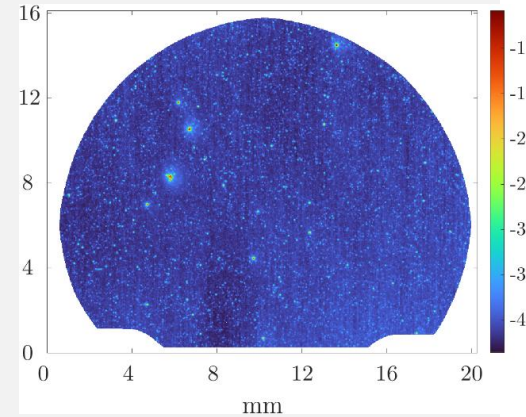


### ➤ Modelisation :

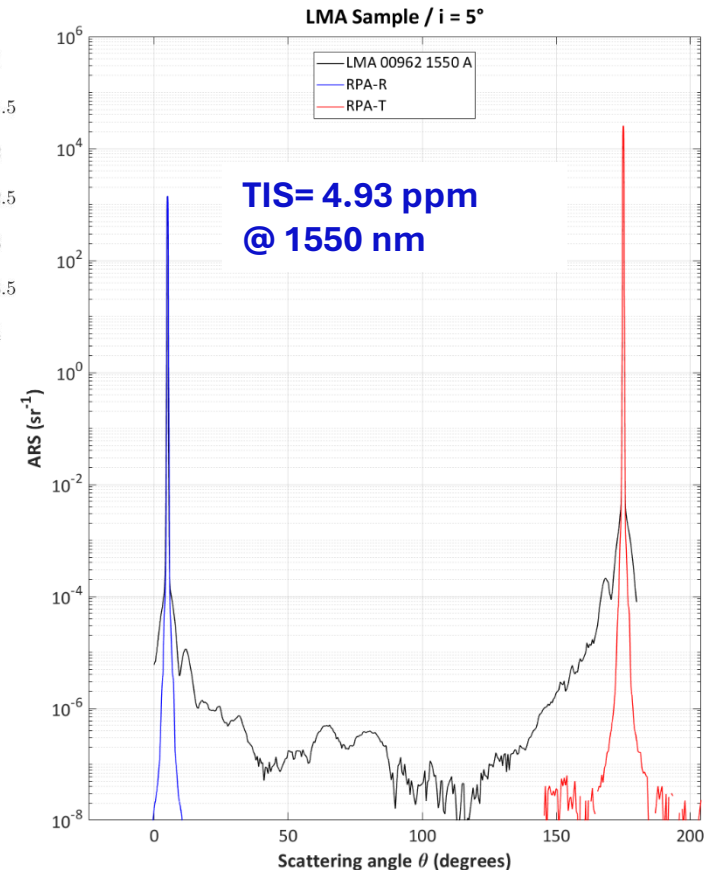
- BSDF = function of roughness, coatings, surface topography and PSD, correlations

### ➤ Metrology :

- SALSA
  - High dynamic
  - Full angular range
  - Wavelength from 400 to 1650 nm
- SPARSE
  - High dynamic
  - Spatially resolved BRDF with localisation of defects
  - In progress : tunable wavelength



Opt. Express 33, p. 22396 (2025)



## Straylight & components : Backscattered light

### ➤ Metrology :

#### ○ BARRITON:

- Low-coherence interferometry with ranging capability and spectrally resolved amplitude/phase measurement
- Measurement of the wavelength dependence of the retroreflection of high efficiency AR coatings with separation of interfaces
- Recording of speckle and Airy patterns in a backscatter configuration
- Noise floor :  $10^{-11}$

#### ○ In progress : BARRITON 2

- Expected noise floor  $\sim 3 \times 10^{-14}$
- Phase measurement of the field backscattered by a surface

#### ○ Proposed

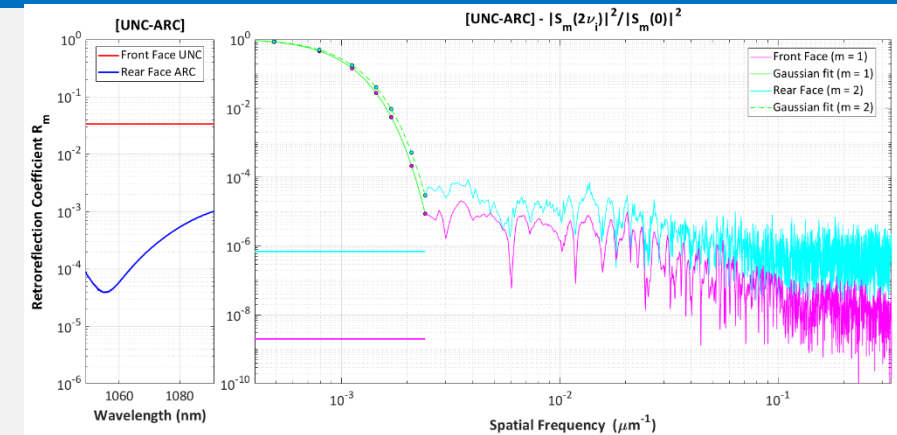
- Extension to the analysis of a full bench

### ➤ Modélisation:

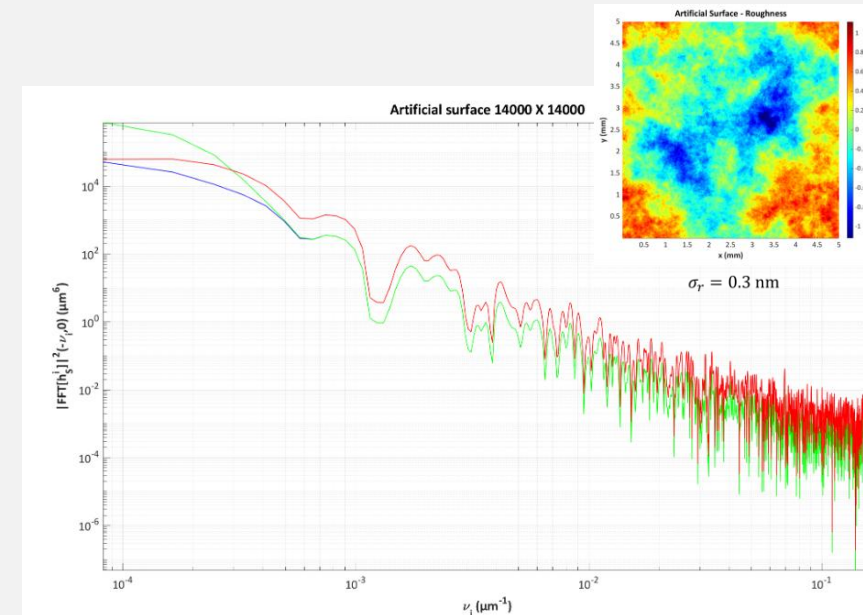
- Generation of artificial surfaces with realistic waviness and roughness features
- Good agreement between experimental results and theoretical modelling of coherent backscattering from a surface
- Very fast dependence of the phase of the scattered field with respect to small change in the angular position of the surface (phase shift in the speckle)
- To be considered in the perturbation budget induced by light scattering

#### ○ In progress :

- Addition of coatings
- Addition of defects



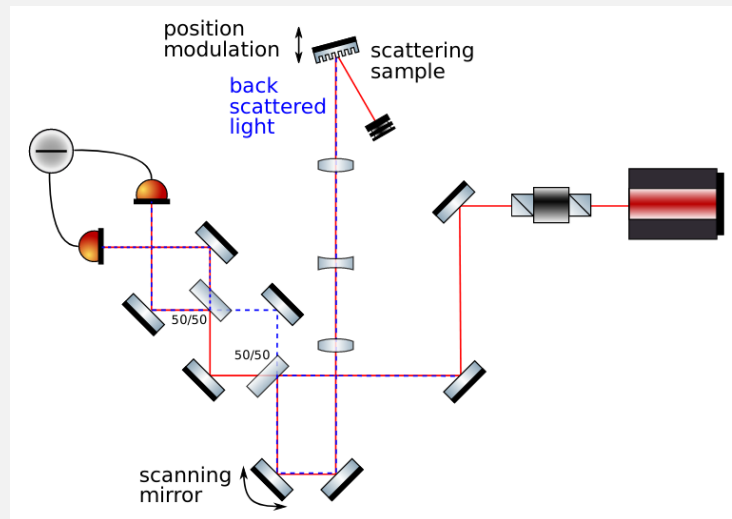
Applied Physics Letters, 2023, 122 (19), pp.1911003.



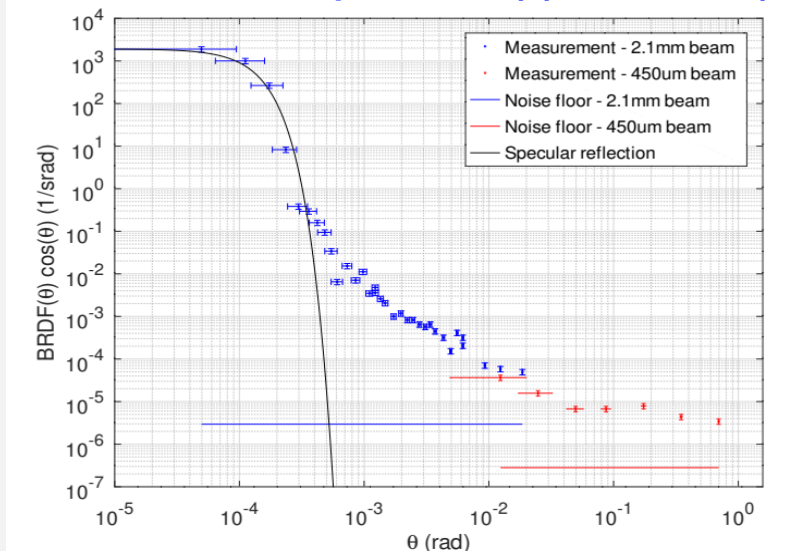
**VIR-0690A-23 : Generate an artificial surface according to shape errors and roughness spec.**

## Precise measurements of back scattered light with back scatter meter

- **Back scatter meter** prototype already developed and tested on a non-isolated bench
  - achieved a sensitivity to recoupled back scattered light  $f_{sc} \sim 10^{-14}$
  - used to characterize components installed on Virgo suspended benches



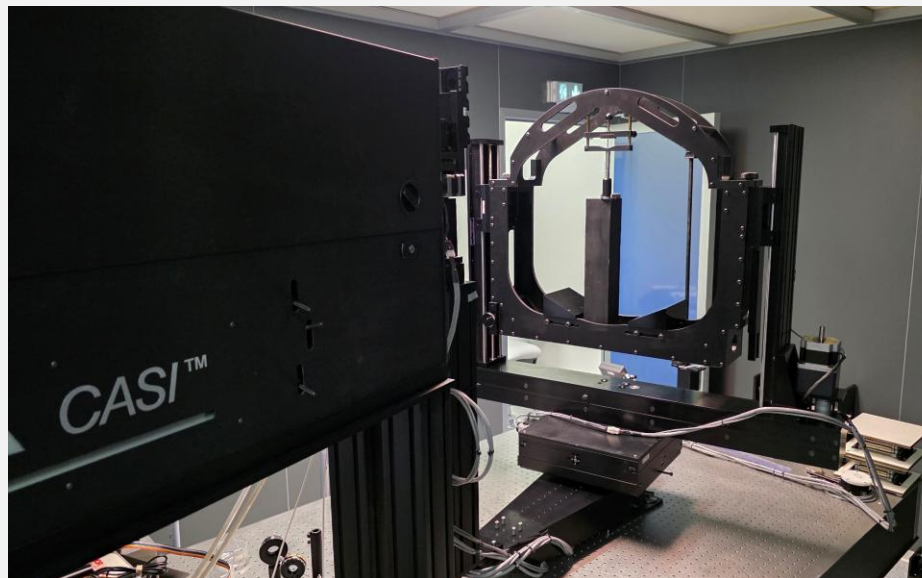
M. Was, E. Polini, *Opt. Lett.* 47(9), 2334-2337 (2022)



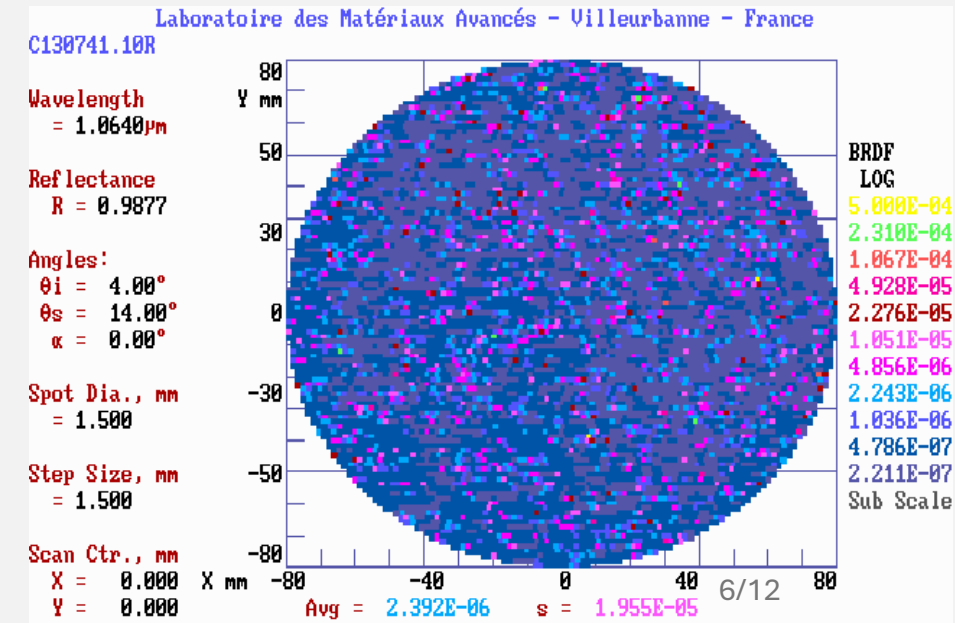
- Improve back-scatter meter sensitivity, by placing the setup on an in-vacuum suspended bench:
  - LAPP R&D platform under construction: see talk from Loic Rolland
  - Main goals:
    - Aims at a factor  $\sim 100$  of improvement in sensitivity:  $10^{-16}$  in fraction of scattered light
    - Measure of scattering at small angle (with large beams), with angular resolution of  $\sim 15 \mu\text{rad}$ , for Virgo like mirrors
    - Study of multiple scattering (simulations + measurements)

## LMA Scatterometer

- ✓ **Commercial system bought in 2000 upgraded 3 times**
  - New large sample holder compatible with 100 kg test mass (2025)
  - Working at 1064 nm
  - Scattering Maps possible on 300 mm
  - Very high signal to noise ratio (low BRDF level measurable :  $10^{-10}$  sr<sup>-1</sup>)



Workshop ET France, 01/04/26





## Identification des sources de lumière diffusée dans les bancs optiques par des mesures de niveau **système**

**ARTEMIS** CNRS / Observatoire de la Côte d'Azur, Nice, France

Frederic Cleva

Adem Dogui (apprenti ingénieur)

Jean-Pierre Coulon

Eleonora Polini

Dylan Banahene-Sabulsky

*Expertise par M. Lintz et A. Roubeau-Tissot*

*(métrologie de la lumière diffusée des bancs de LISA, mandat CNES/ESA)*

- SLS\_Id: pour quoi ? - Spécifications
- Concept - Développements
- Résultats
- Conclusion - Status actuel - Etapes futures

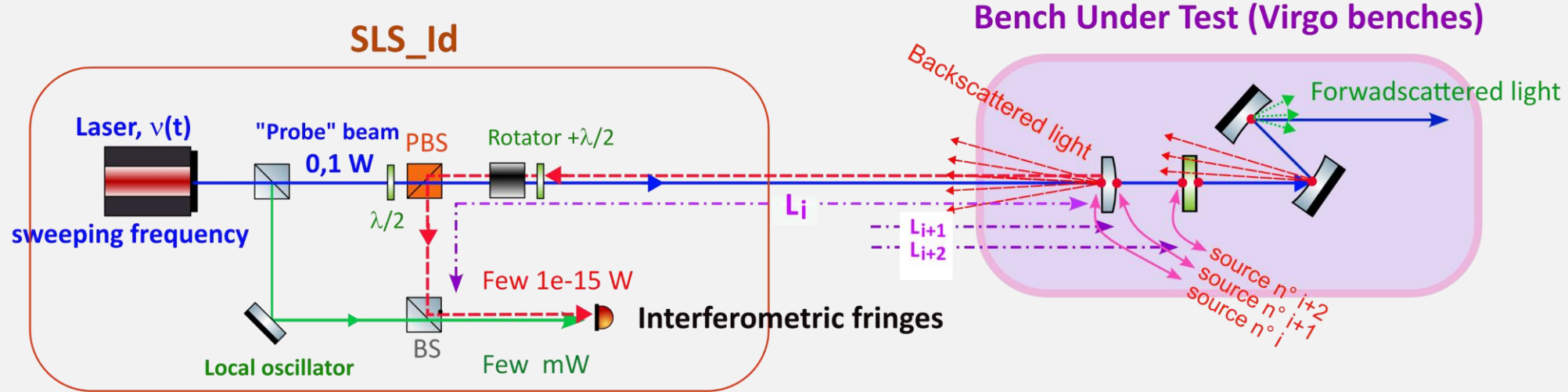
## Quelle utilité?

- Le **SLS\_Id** mesure la quantité de Lumière **RétroDiffusée (LRD)** par **n'importe qu'elle surface** rencontrée par le faisceau transmis au travers d'un banc optique testé (ex: bancs Virgo)
  - **Mesure de niveau système**
    - Évalue la contribution individuelle de « LRD » *sans nécessité de démonter le composant*
    - Mesure in-situ possible
      - *Phase d'intégration des bancs*
      - *Suivi au long cours (e.g. contamination particulière durant maintenance, vieillissement, désalignements internes...)*
  - **Identifie les contributeurs de LRD (hors-spécifications ou non)**
  - Ne dit rien de l'effet sur le signal science  
*Responsabilité de l'opérateur du banc*

## Spécifications

- Identifie la position d'une source de LRD avec une précision < **1 mm**
- Cible placée à qq mètres (**~ 0 - 10 m**)
- Détecte < **1e-14** (rel.) de LRD couplé dans l'angle solide défini par le faisceau incident
- Instrument portable

# SLS\_Id : Principe



$$\text{signal interférométrique, } s(t) \propto \sum_i \sqrt{P_{SL_i} \cdot P_0} \cdot \sin\left(\frac{4\pi}{c} \cdot \nu(t) \cdot L_i\right) + P_0$$

Mesure de  $s(t)$  avec  $\nu$  balayé :  $P_{SL_i}$  et  $L_i$ , extraits par post-processing



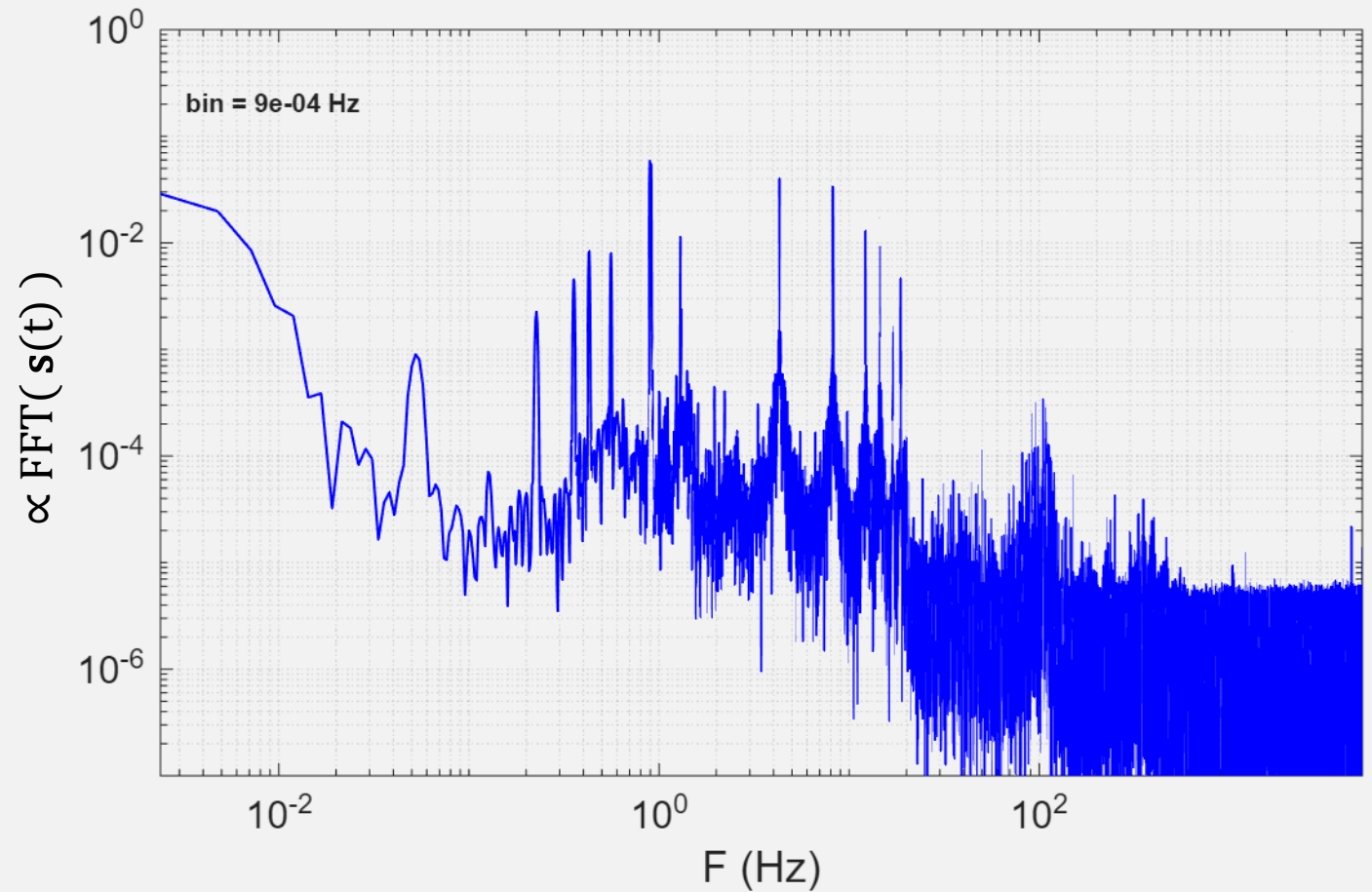
- Connaissance précise de  $\nu(t)$
- excursion large de  $\nu(t)$  pour une résolution spatiale accrue

$\nu(t)$  : laser frequency  
 $c$  : speed of light  
 $P_0$  : local oscillator opt. power  
 $P_{SL_i}$  : Backscattered opt. power

# SLS\_Id : Contrôle de la fréquence – balayage linéaire

- Balayage linéaire:  $\mathbf{v}(t) = \vartheta \times time \rightarrow \mathbf{s}(t) \propto \sum_i \sqrt{P_{SL_i}} \cdot \sin\left(2\pi \cdot \left[\frac{2}{c} \cdot \vartheta \cdot L_i\right] \cdot t\right)$

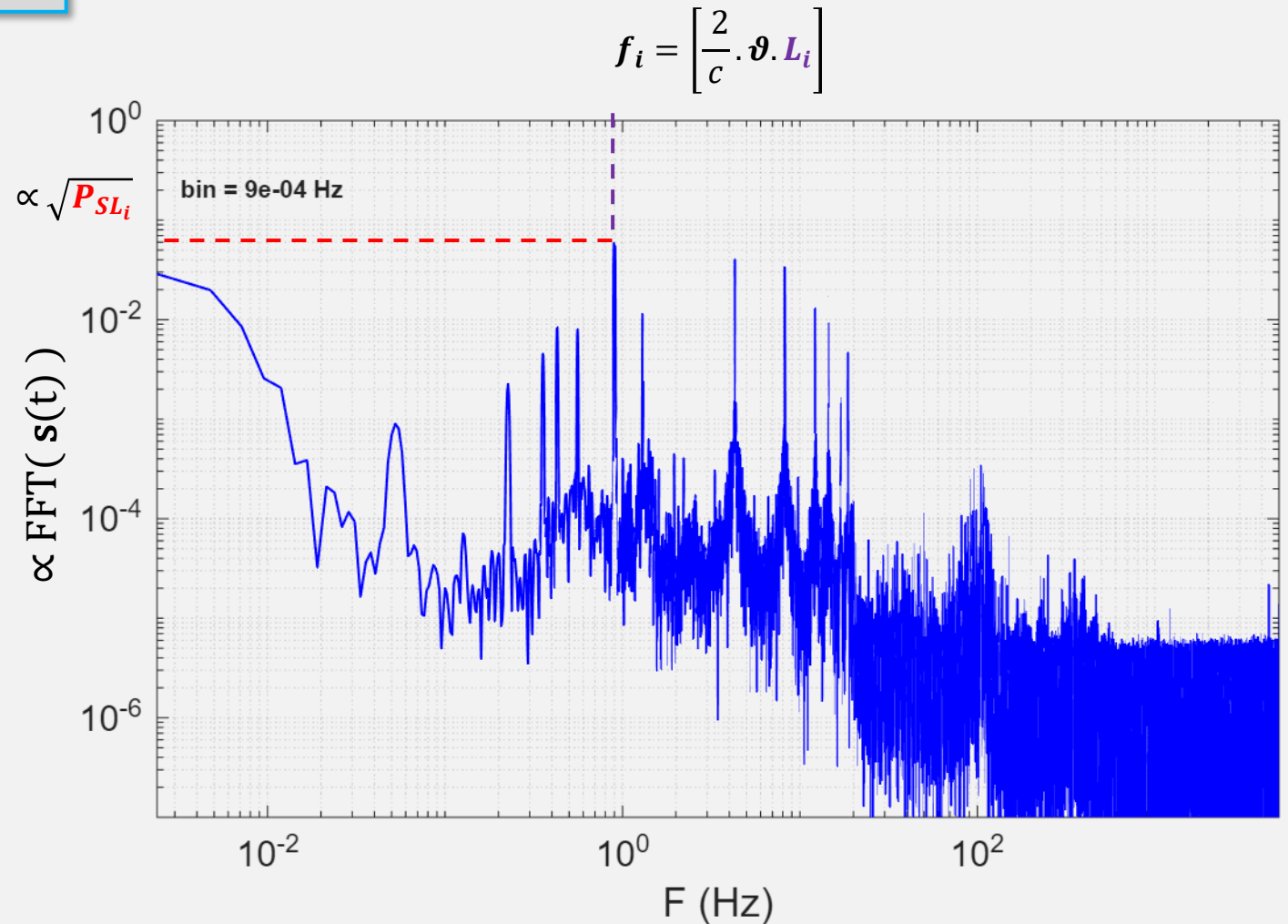
FFT(  $\mathbf{s}(t)$  )  $\rightarrow P_{SL_i}, L_i$



# SLS\_Id : Contrôle de la fréquence – balayage linéaire

- Balayage linéaire :  $\mathbf{v}(t) = \vartheta \times \text{time} \rightarrow \mathbf{s}(t) \propto \sum_i \sqrt{P_{SL_i}} \cdot \sin \left( 2\pi \cdot \left[ \frac{2}{c} \cdot \vartheta \cdot L_i \right] \cdot t \right)$

$$\text{FFT}(\mathbf{s}(t)) \rightarrow P_{SL_i}, L_i$$



# SLS\_Id : Optical frequency control - Linear sweep

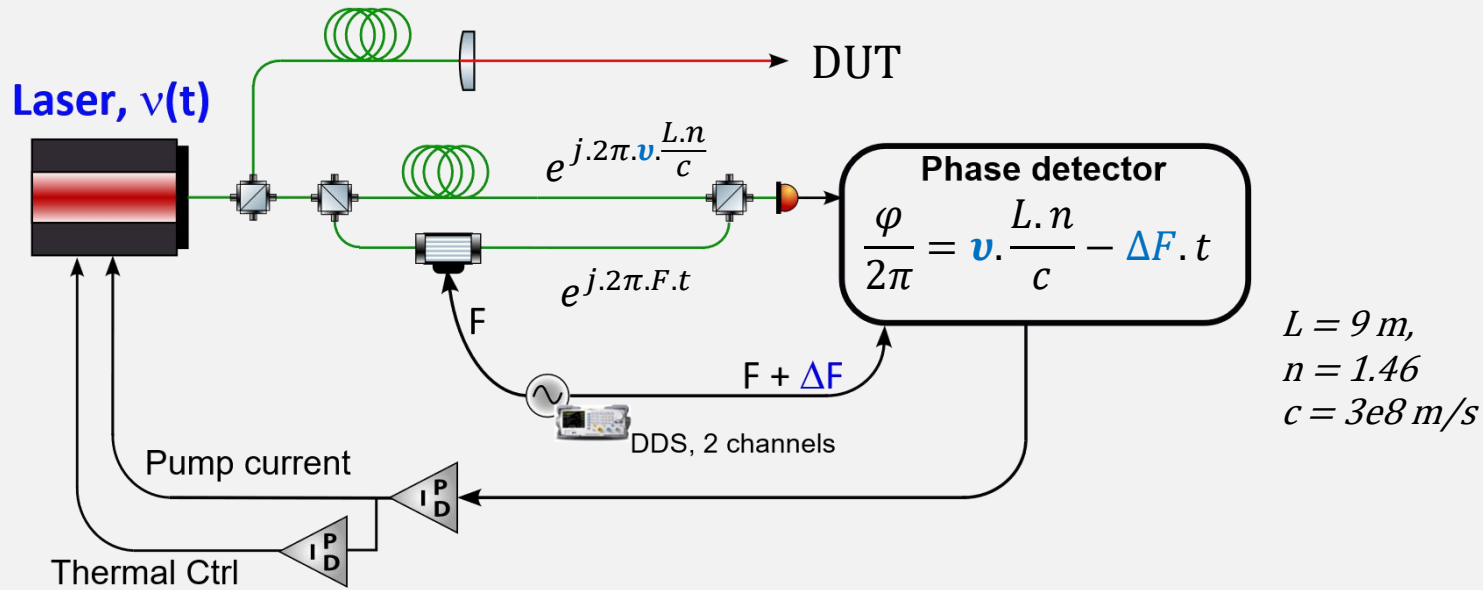
- Balayage linéaire :  $\nu(t) = \vartheta \times \text{time} \rightarrow s(t) \propto \sum_i \sqrt{P_{SL_i}} \cdot \sin\left(2\pi \cdot \left[\frac{2}{c} \cdot \vartheta \cdot L_i\right] \cdot t\right)$

$$\text{FFT}(s(t)) \rightarrow P_{SL_i}, L_i$$

**Implémentation:** lock sur Mach-Zehnder déséquilibré + détection hétérodyne décalée (\*)

(\*) H. Jiang, F. Kéfélian et al., ARTEMIS, "An agile laser with ultra-low frequency noise and high sweep linearity", *Opt. Express*, 2010

(\*) A. Roubeau-Tissot, ARTEMIS, «Interférométrie à dérive de fréquence pour la mesure de la lumière parasite sur l'instrument LISA », *Phd Thesis*, 2024



# SLS\_Id : Optical frequency control - Linear sweep

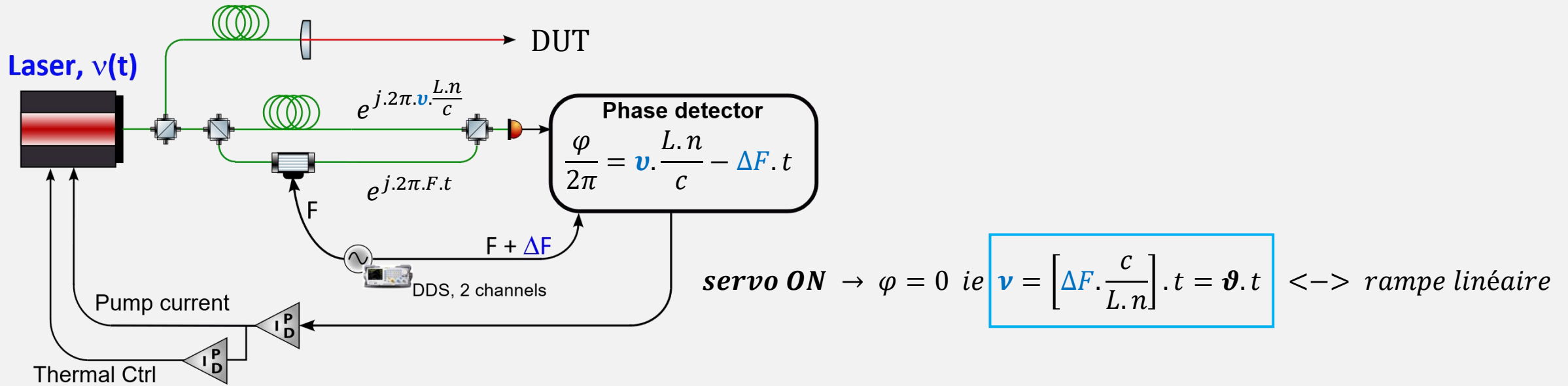
- Balayage linéaire :  $\nu(t) = \vartheta \times \text{time} \rightarrow s(t) \propto \sum_i \sqrt{P_{SL_i}} \cdot \sin\left(2\pi \cdot \left[\frac{2}{c} \cdot \vartheta \cdot L_i\right] \cdot t\right)$

$$\text{FFT}(s(t)) \rightarrow P_{SL_i}, L_i$$

**Implémentation:** lock sur Mach-Zehnder déséquilibré + détection hétérodyne décalée (\*)

(\*) H. Jiang, F. Kéfélian et al., ARTEMIS, "An agile laser with ultra-low frequency noise and high sweep linearity", *Opt. Express*, 2010

(\*) A. Roubeau-Tissot, ARTEMIS, «Interférométrie à dérive de fréquence pour la mesure de la lumière parasite sur l'instrument LISA », *Phd Thesis*, 2024



# SLS\_Id : Optical frequency control - Linear sweep

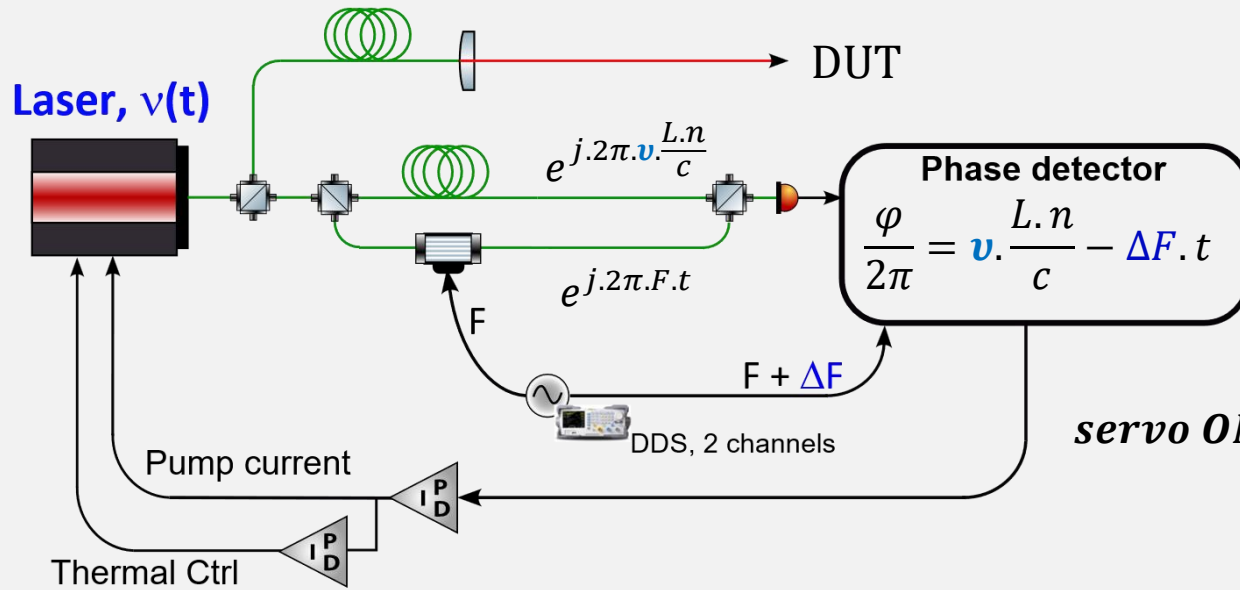
- Balayage linéaire :  $\nu(t) = \vartheta \times \text{time} \rightarrow s(t) \propto \sum_i \sqrt{P_{SL_i}} \cdot \sin\left(2\pi \cdot \left[\frac{2}{c} \cdot \vartheta \cdot L_i\right] \cdot t\right)$

$$\text{FFT}(s(t)) \rightarrow P_{SL_i}, L_i$$

**Implémentation:** lock sur Mach-Zehnder déséquilibré + détection hétérodyne décalée (\*)

(\*) H. Jiang, F. Kéfélian et al., ARTEMIS, "An agile laser with ultra-low frequency noise and high sweep linearity", *Opt. Express*, 2010

(\*) A. Roubeau-Tissot, ARTEMIS, «Interférométrie à dérive de fréquence pour la mesure de la lumière parasite sur l'instrument LISA », *Phd Thesis*, 2024



NA:  $F = 50 \text{ MHz}$ ,  $\Delta F = 30 \text{ Hz}$ ,  $L \sim 9 \text{ m}$ ,  $\vartheta = 0.7 \text{ GHz/s}$   
 Rampe sur 4 mn  $\rightarrow$  span = 160 GHz

$$\rightarrow \delta L_i = \frac{1}{2} \frac{c}{\Delta \nu} = 0.9 \text{ mm}$$

# SLS\_Id : Optical frequency control - Linear sweep

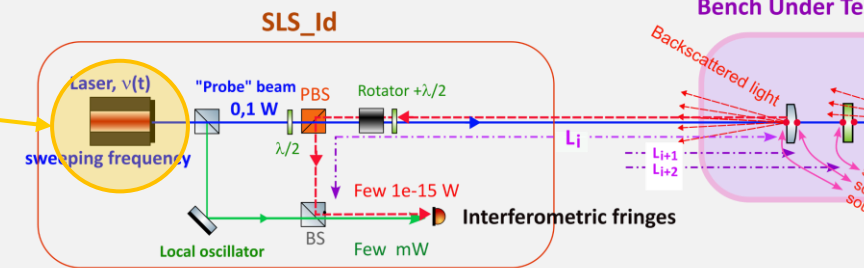
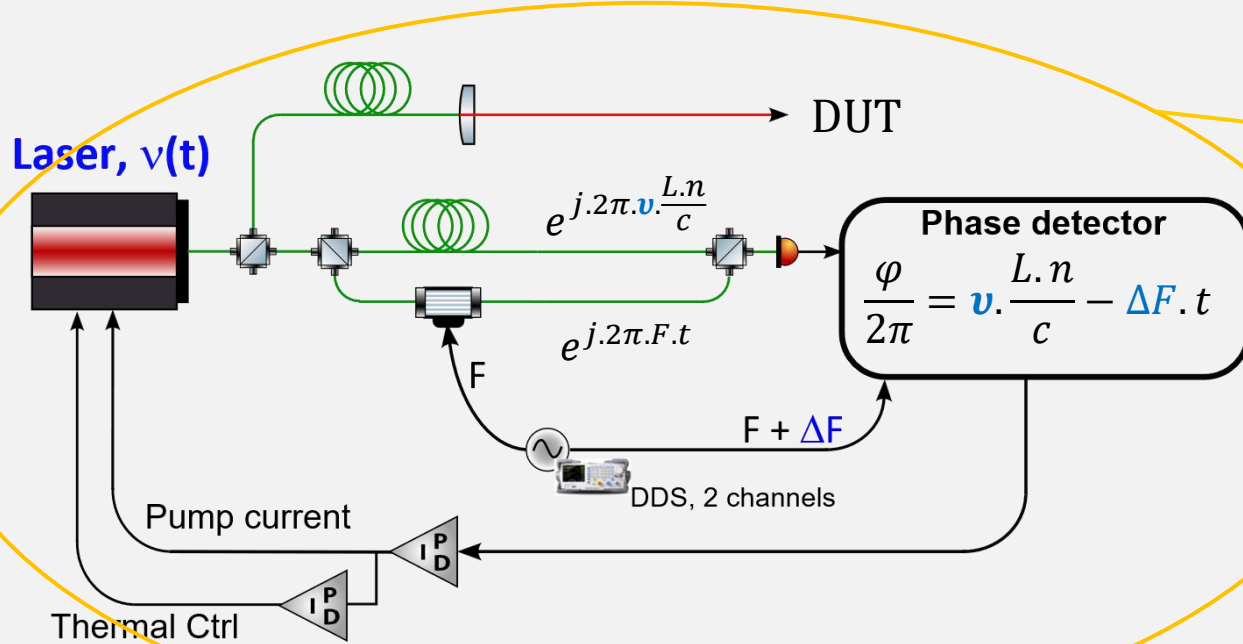
- Balayage linéaire :  $\nu(t) = \vartheta \times \text{time} \rightarrow s(t) \propto \sum_i \sqrt{P_{SL_i}} \cdot \sin\left(2\pi \cdot \left[\frac{2}{c} \cdot \vartheta \cdot L_i\right] \cdot t\right)$

$$\text{FFT}(s(t)) \rightarrow P_{SL_i}, L_i$$

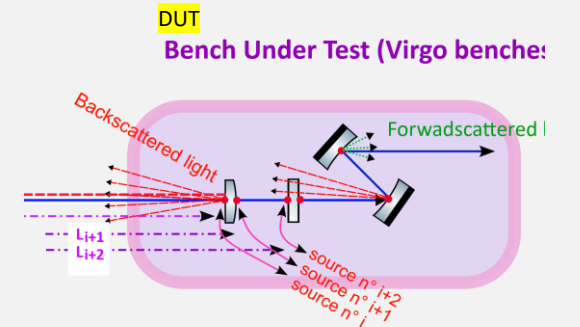
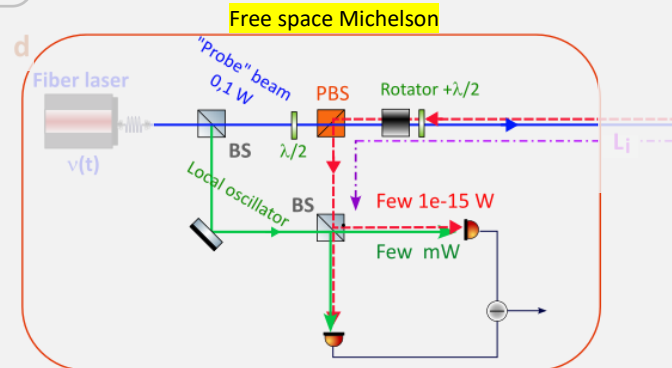
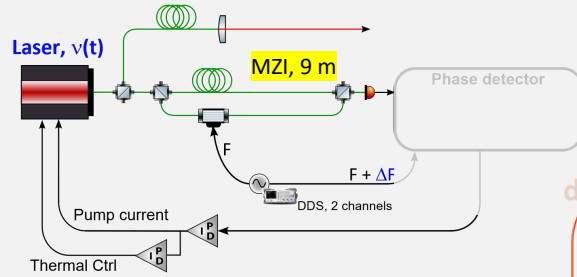
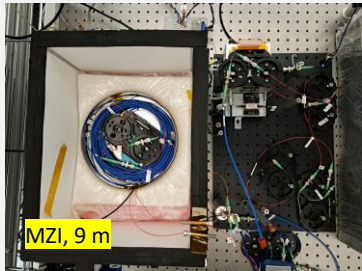
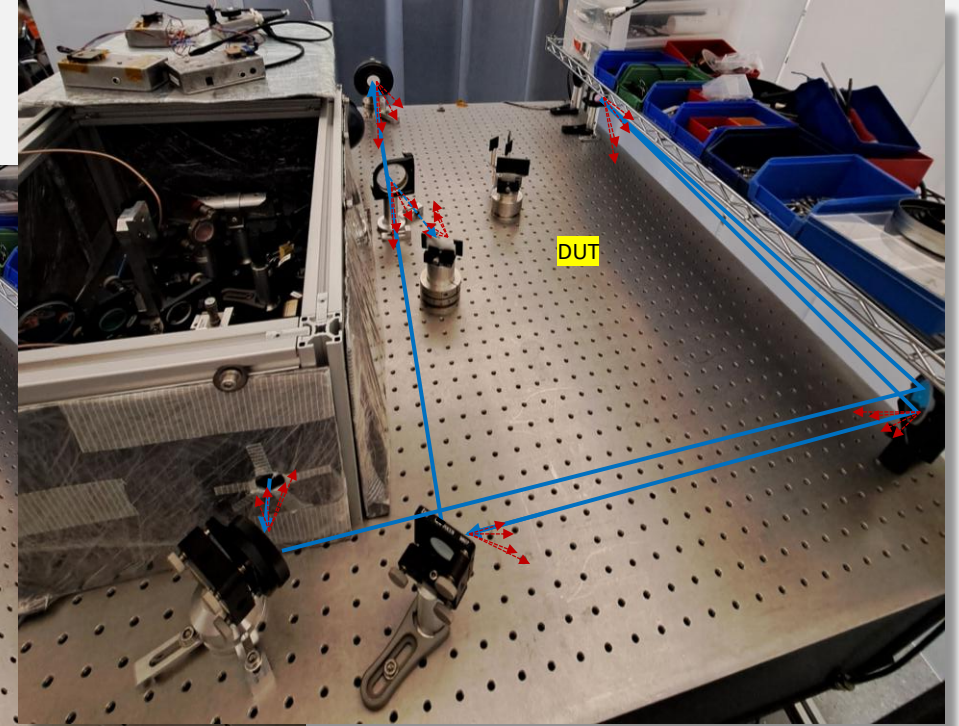
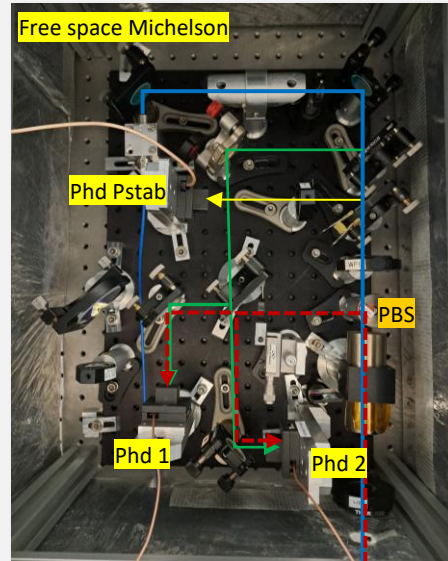
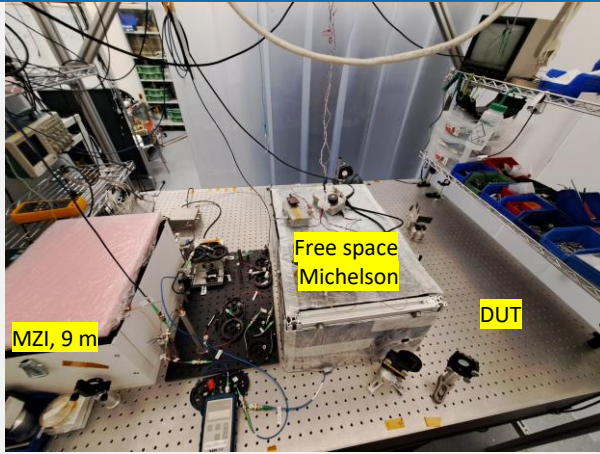
**Implémentation:** lock sur Mach-Zehnder déséquilibré + détection hétérodyne décalée (\*)

(\*) H. Jiang, F. Kéfélian et al., ARTEMIS, "An agile laser with ultra-low frequency noise and high sweep linearity", *Opt. Express*, 2010

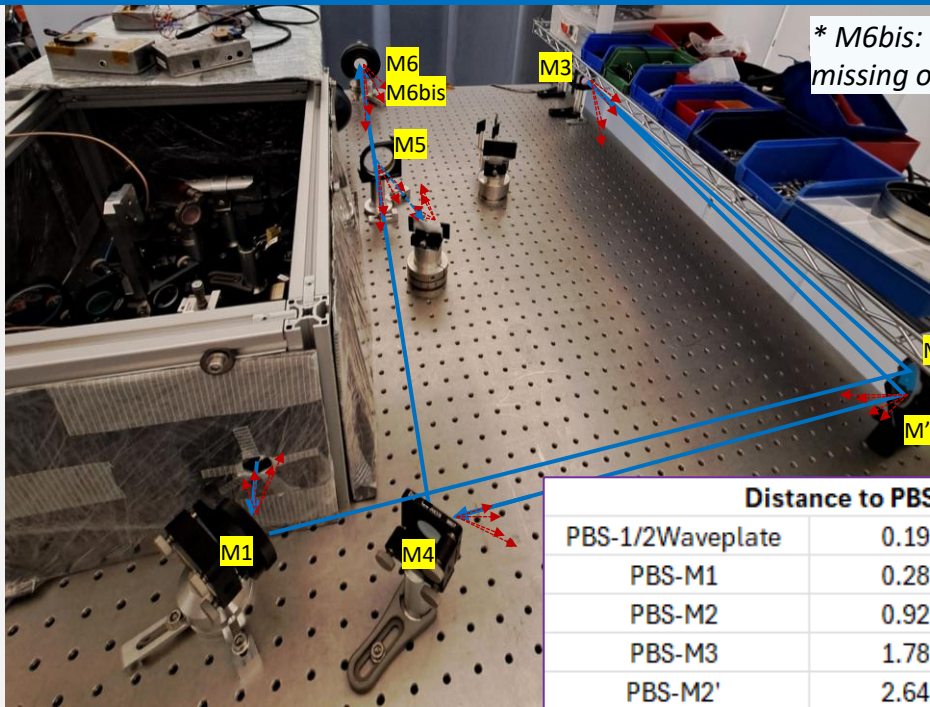
(\*) A. Roubeau-Tissot, ARTEMIS, «Interférométrie à dérive de fréquence pour la mesure de la lumière parasite sur l'instrument LISA », *Phd Thesis*, 2024



# SLS\_Id : Prototype

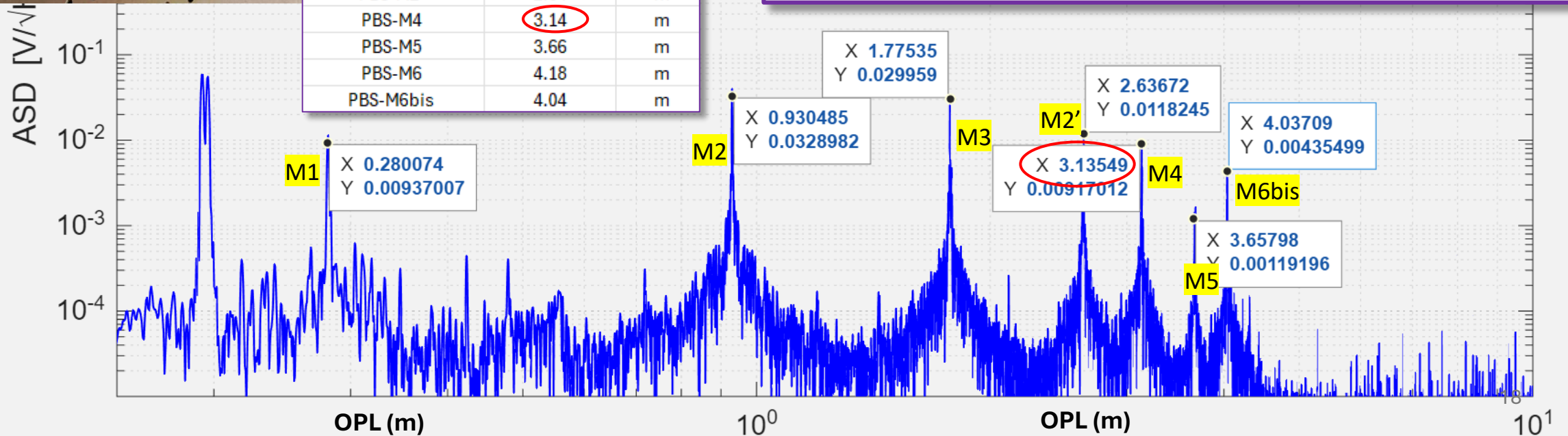
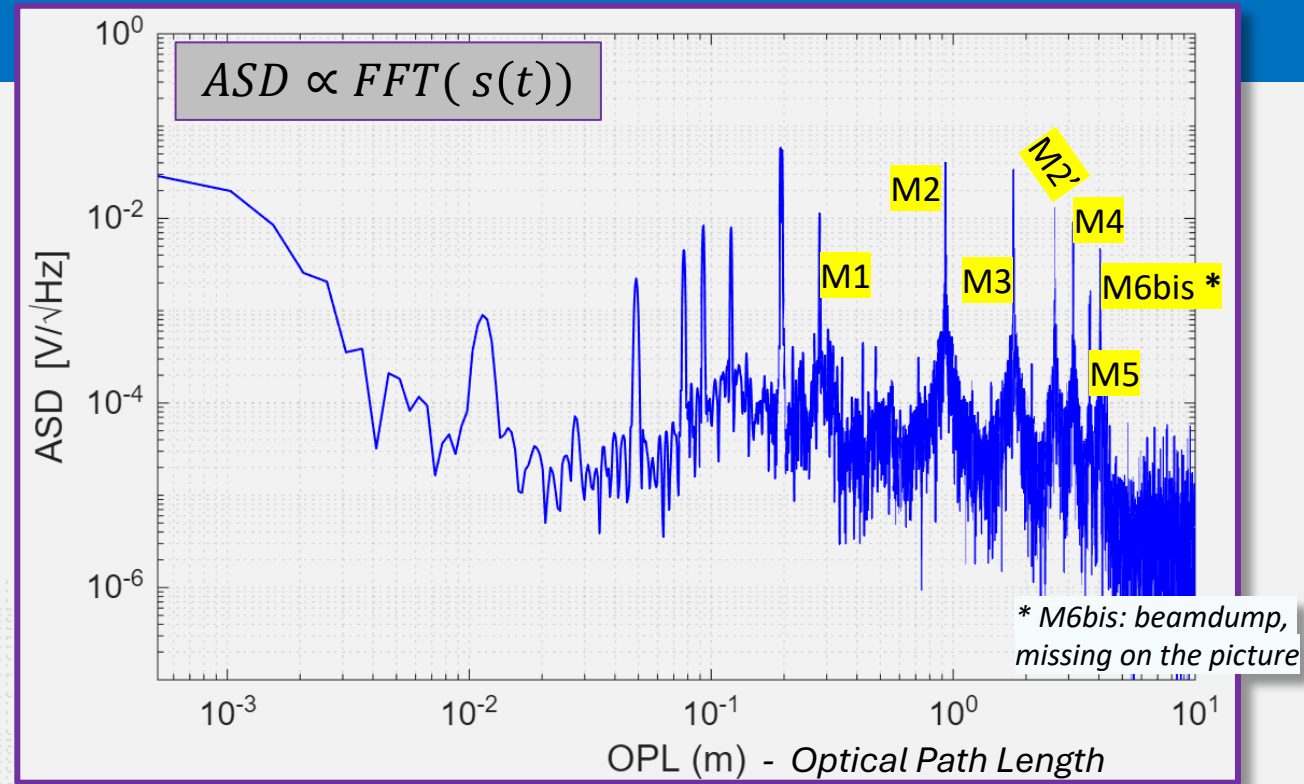


# SLS\_Id : identification des composants

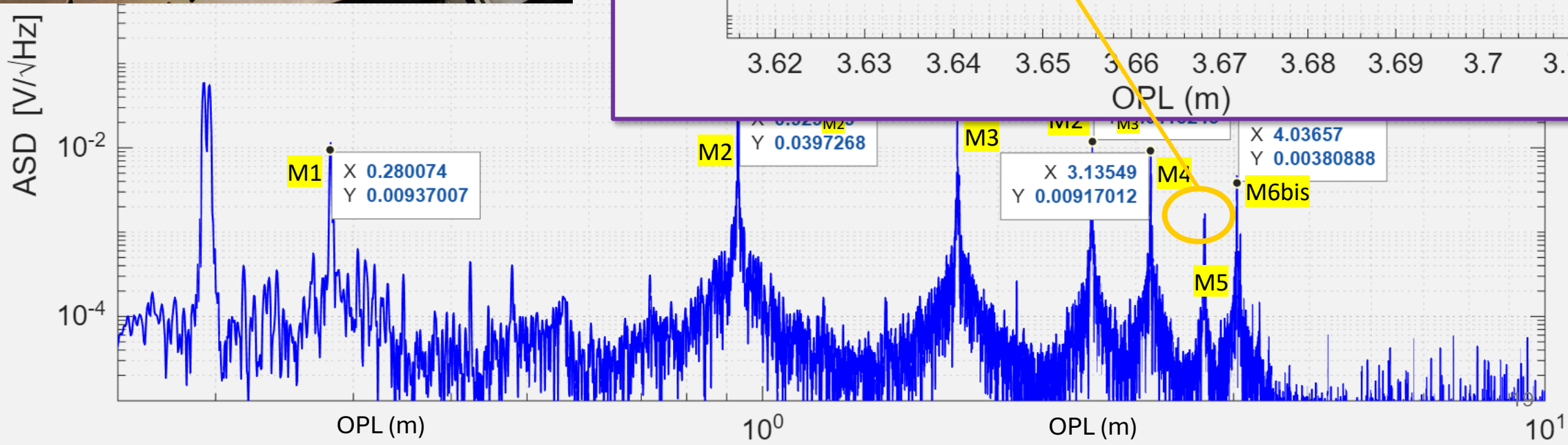
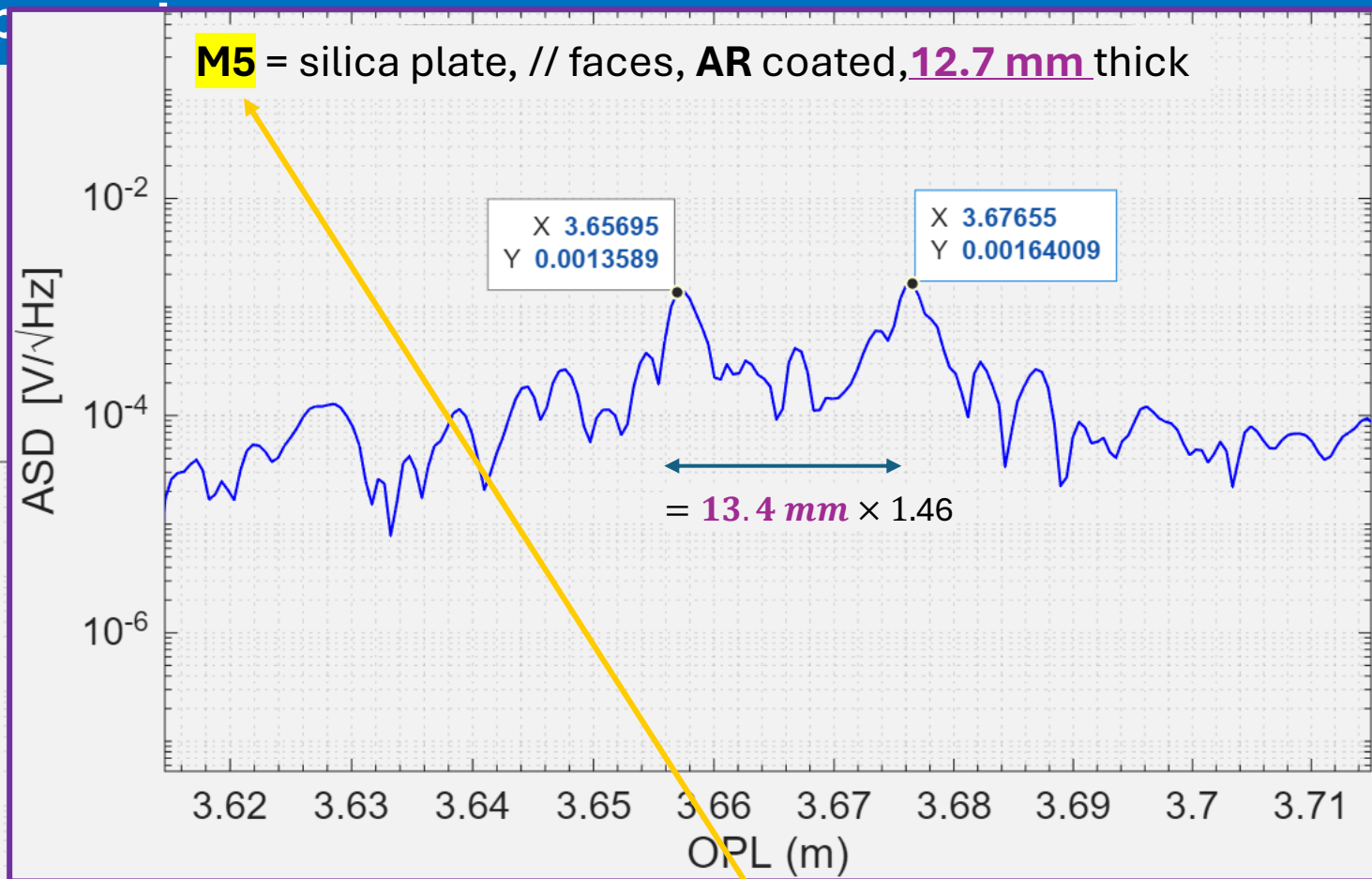
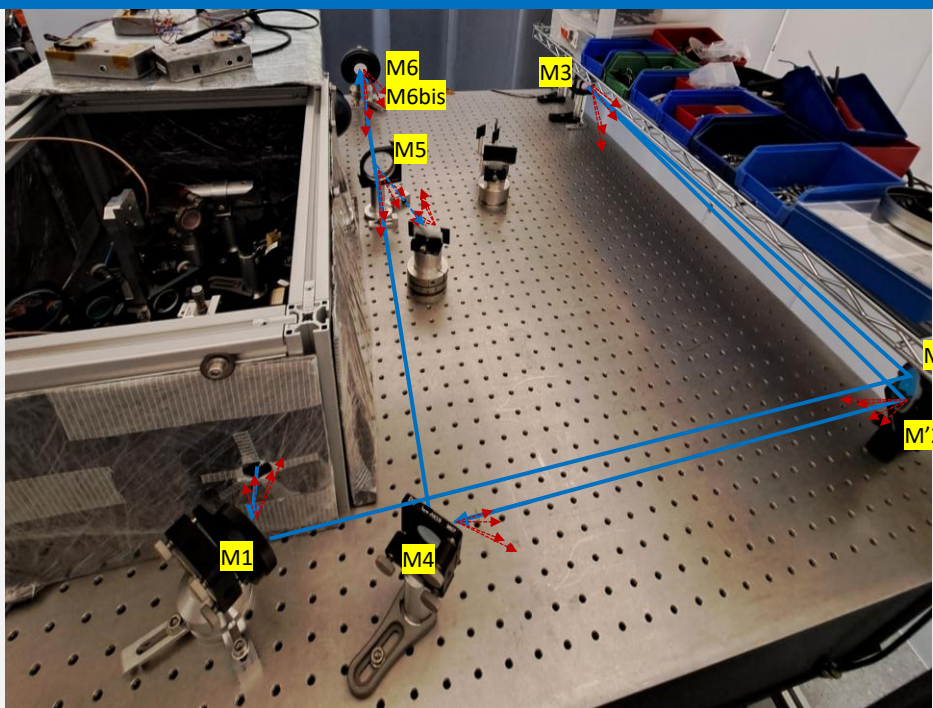


\* M6bis: beamdump, missing on the picture

Distance to PBS (+/- 5 mm)		
PBS-1/2Waveplate	0.19	m
PBS-M1	0.28	m
PBS-M2	0.92	m
PBS-M3	1.78	m
PBS-M2'	2.64	m
PBS-M4	3.14	m
PBS-M5	3.66	m
PBS-M6	4.18	m
PBS-M6bis	4.04	m



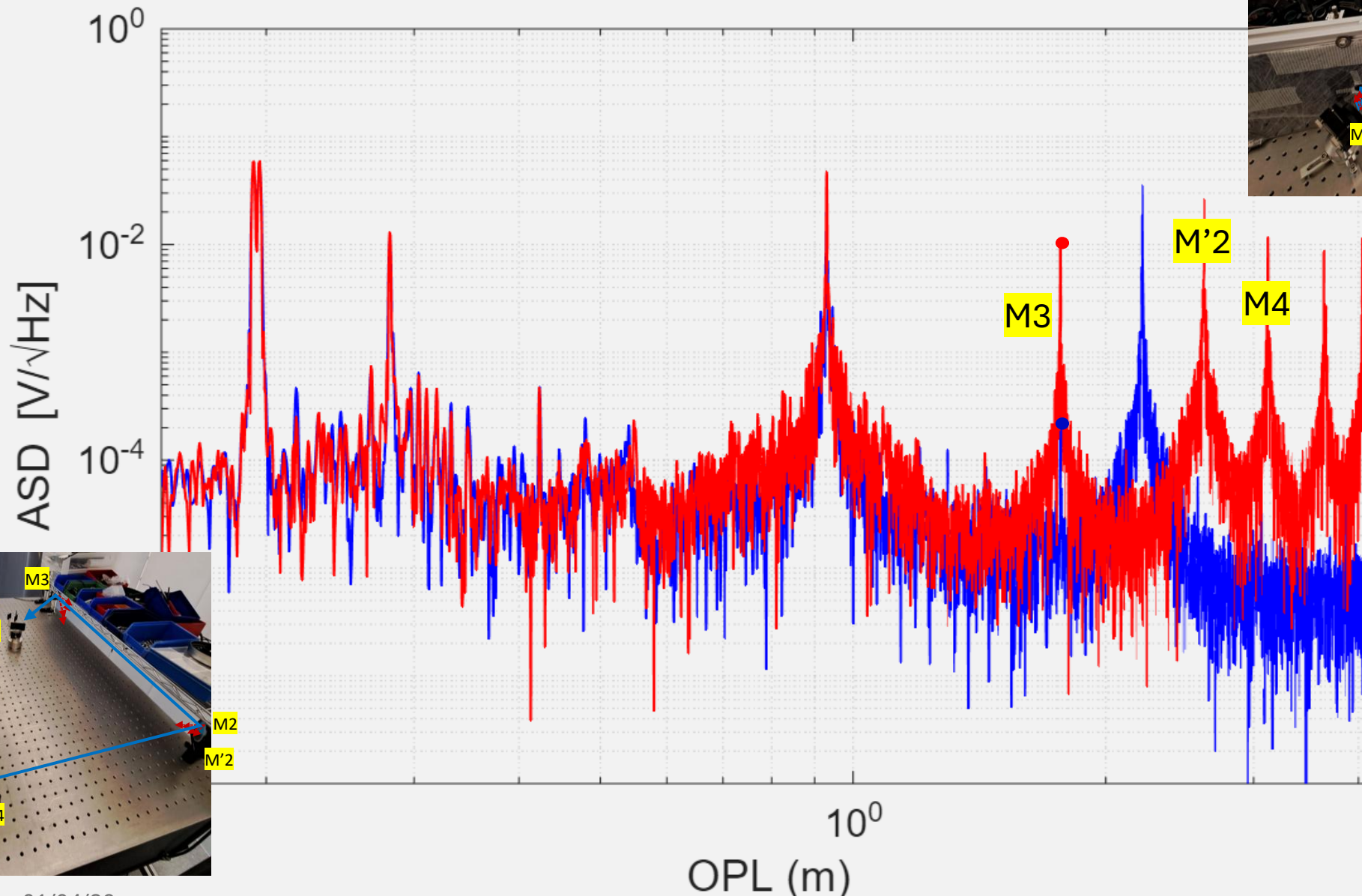
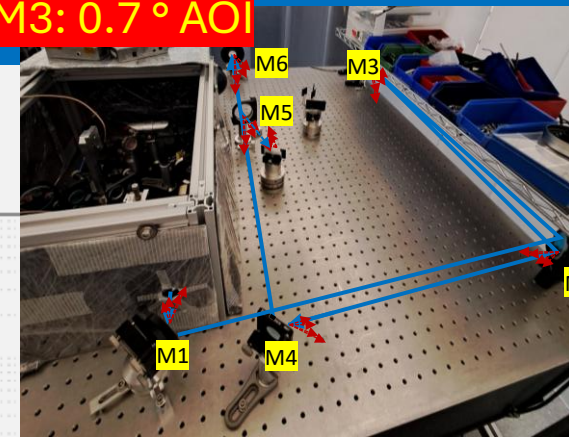
# SLS\_Id : identification des comp



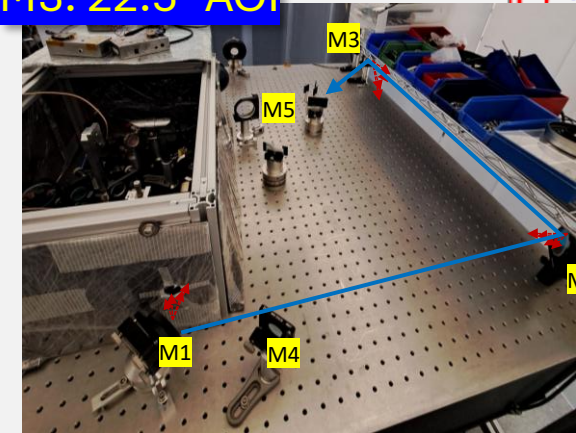
# SLS\_Id : Détektivité

M3: 0.7° AOI

M3: Rmax, AOI 6°, 4 m courbure, diffusion 5.5 ppm, LMA (Lyon)



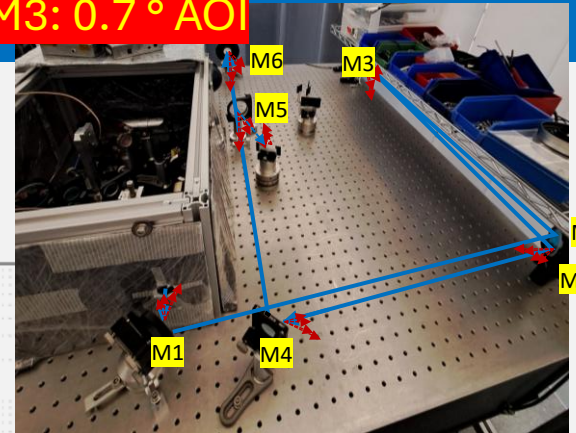
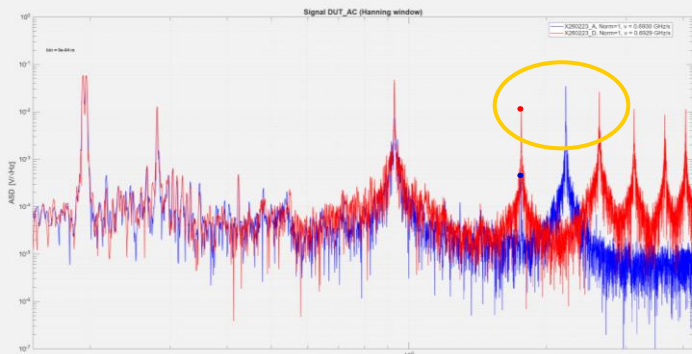
M3: 22.5° AOI



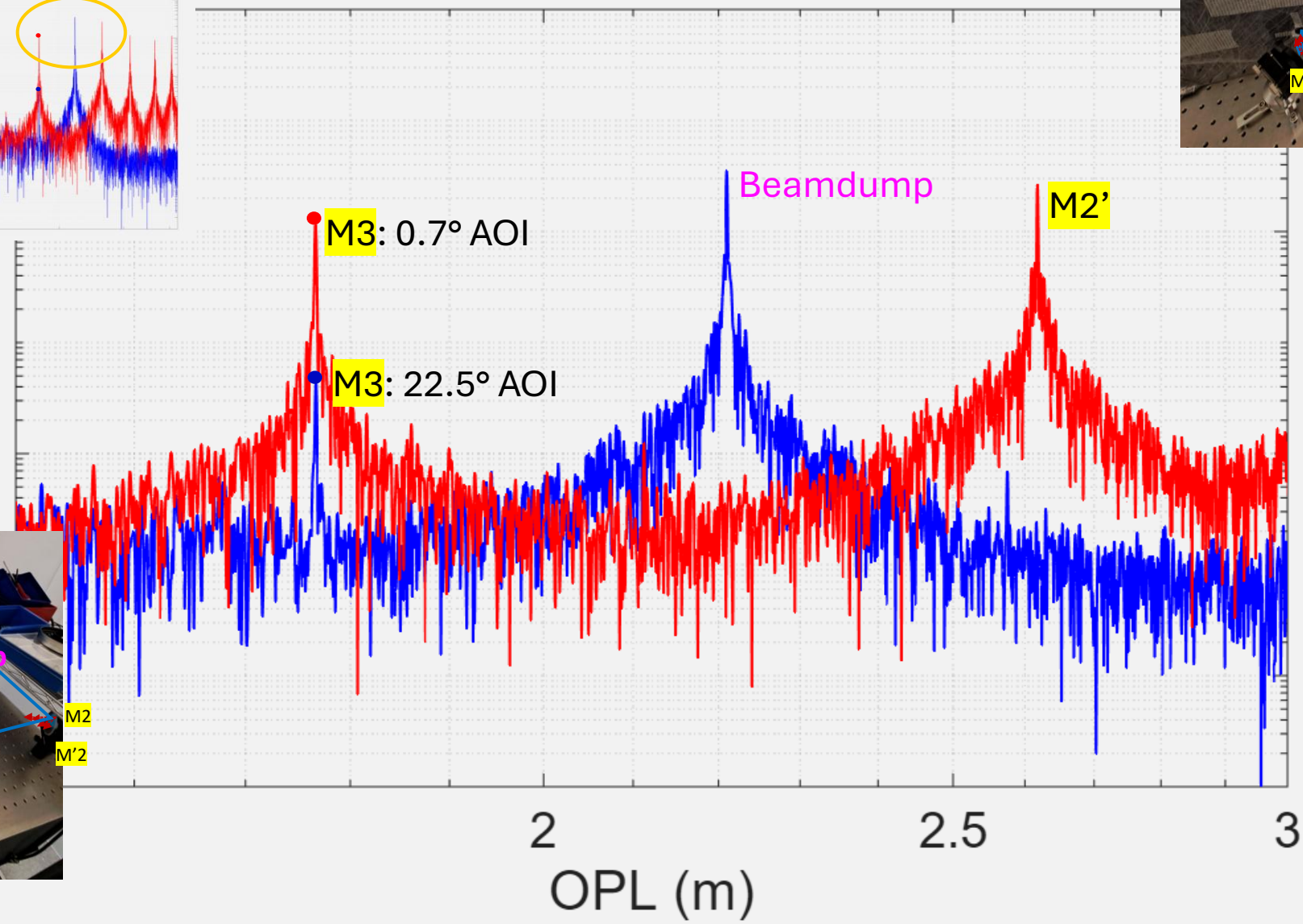
# SLS\_Id : Détektivité

M3: 0.7° AOI

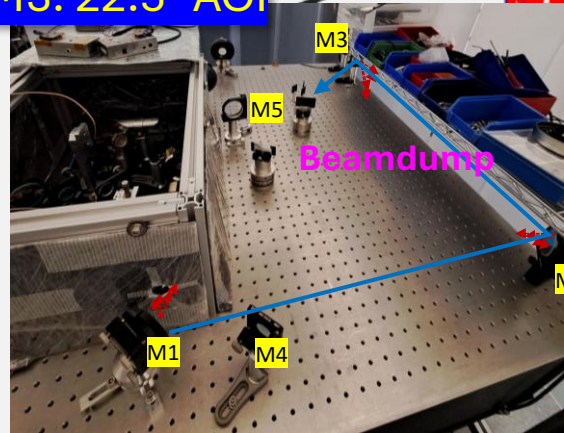
M3: Rmax, AOI 6°, 4 m courbure, diffusion 5.5 ppm, LMA (Lyon)



ASD [A√Hz]



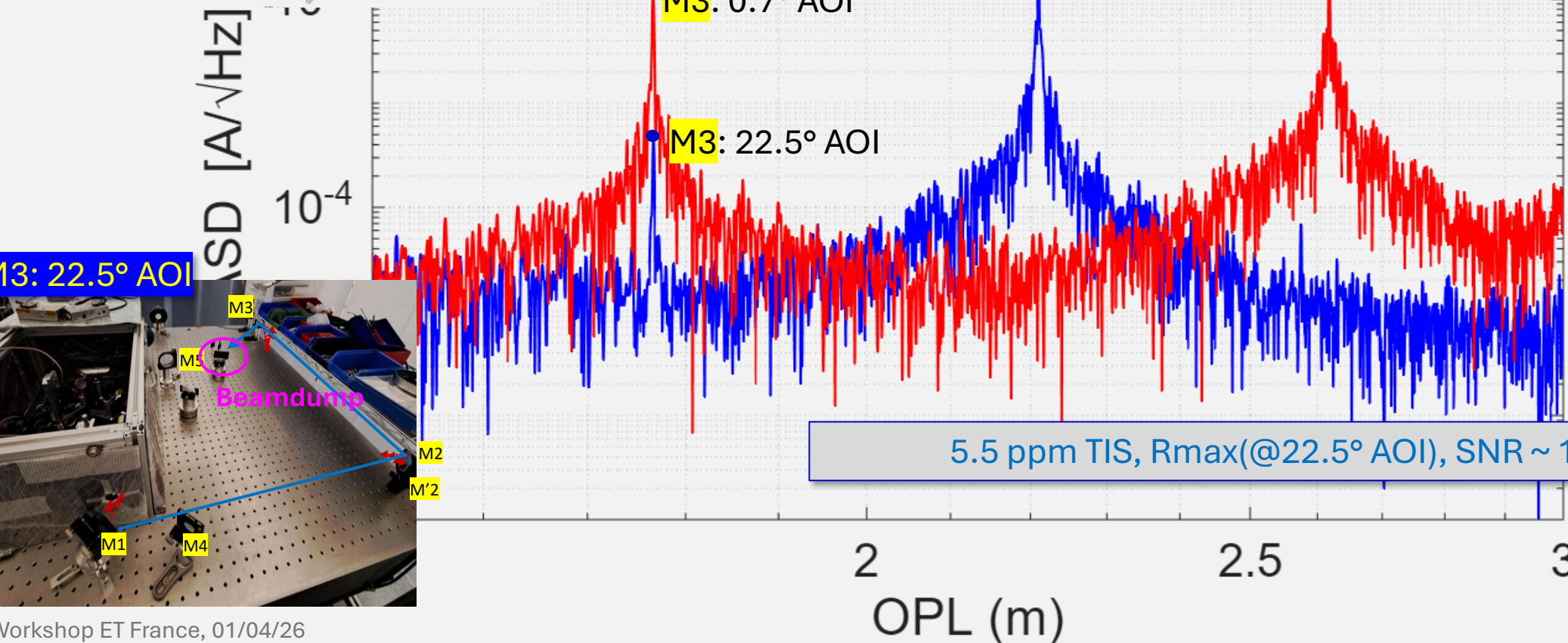
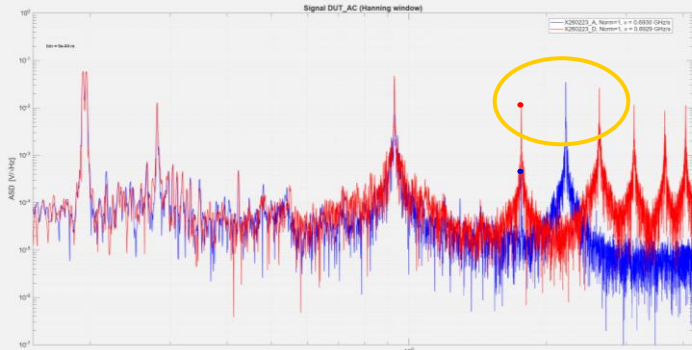
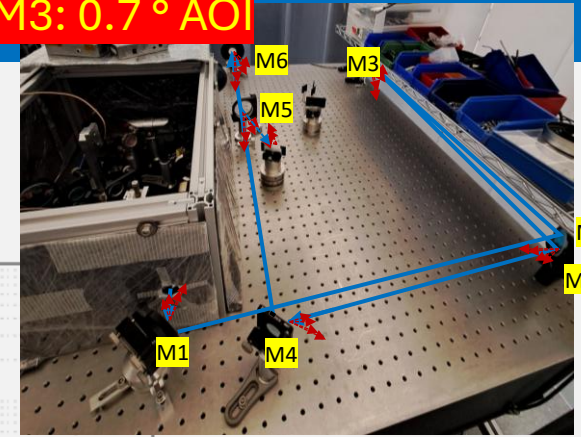
M3: 22.5° AOI



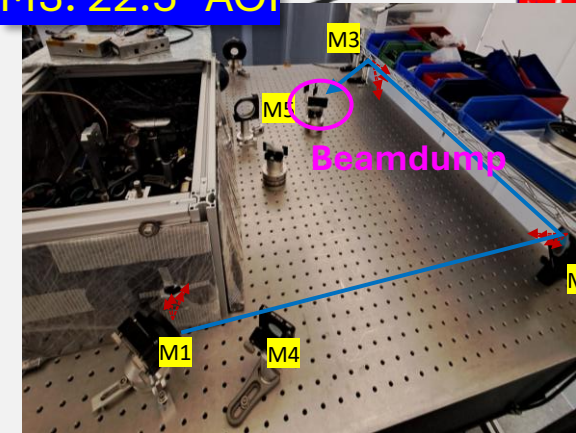
# SLS\_Id : Détektivité

M3: 0.7° AOI

M3: Rmax, AOI 6°, 4 m courbure, diffusion 5.5 ppm, LMA (Lyon)



M3: 22.5° AOI



# SLS\_Id : Détektivité

$$2 \cdot \sqrt{P_{SLi} \cdot P_0} \cdot 0,8 \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} = 3 \cdot 10^{-10} \text{ A} / \sqrt{\text{Hz}}$$

$4 \cdot 10^{-17} \text{ W}^{(1,2)}$

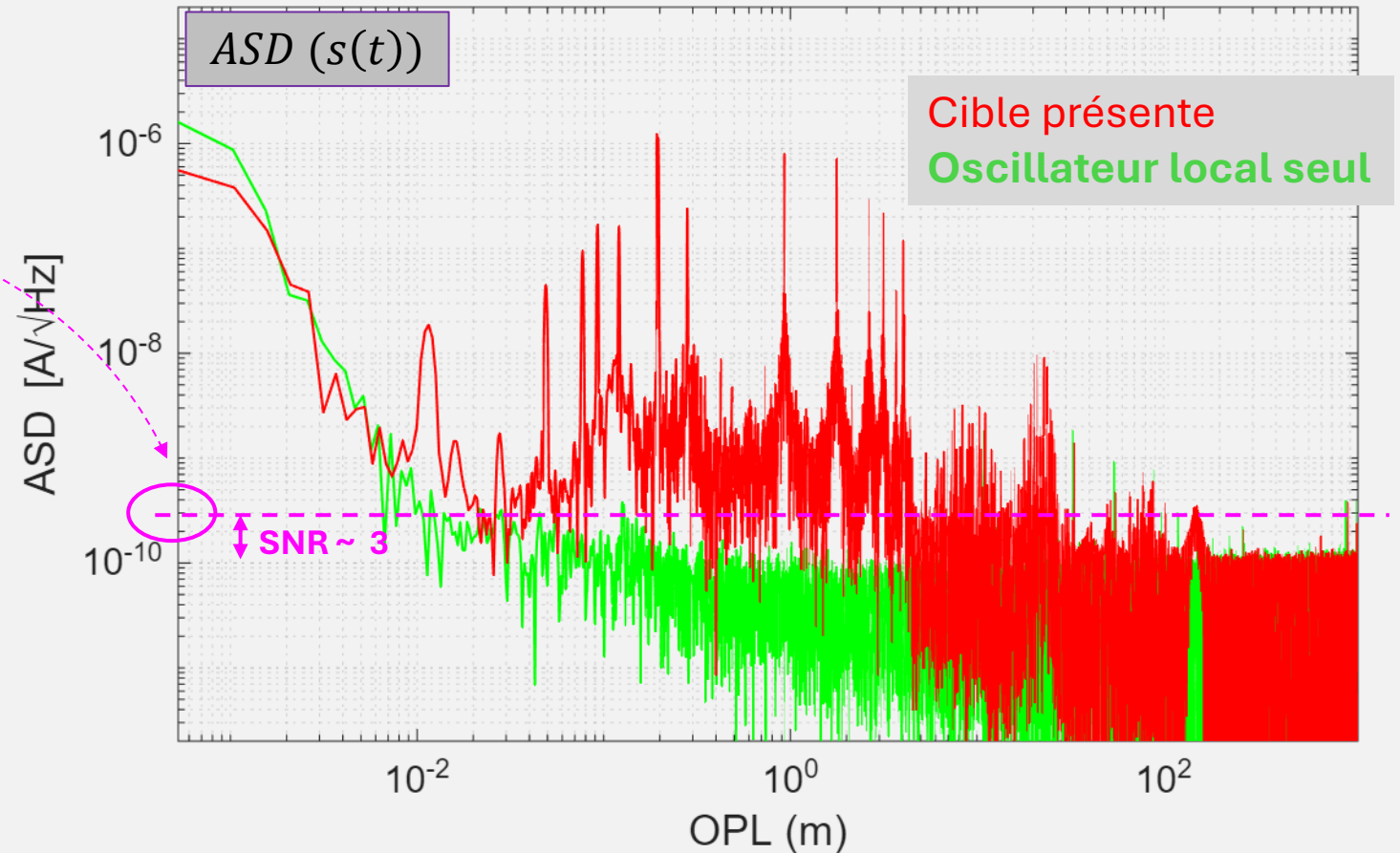
$1,6 \text{ mW}$

<sup>(1)</sup>  $7 \cdot 10^{-7} \text{ sr}$  angle solide (faisceau gaussien, 700  $\mu\text{m}$  waist)

$$\rightarrow \text{BRDF} \cdot \cos(\theta) = 3 \cdot 10^{-9} \text{ sr}^{-1} \text{ }^{(2)}$$

<sup>(2)</sup> **22 mW** incident sur la cible

Rem. : contribution d'un diffuseur lambertien de 1 ppm TIS\* :  $3 \cdot 10^{-7} \cdot \cos(\theta) \text{ sr}^{-1}$



## ❑ SLS\_Id performances

- Résolution spatiale < 1 mm  
*Frequency span = 150 GHz*

- Seuil de détection < qq 4e-17 W

*Soit, miroirs de type LMA <sup>1</sup> la contribution LRD est visible <sup>2</sup>*

*<sup>1</sup> TIS < 10 ppm, <sup>2</sup> (SNR ~10, dans un environnement std de laboratoire)*

---

## ❑ Etapes futures - en cours

- Laser fibré -> laser diode  
balayage de fréquence **plus rapide** (x10?) & **plus large** (x4)
- Schéma de détection hétérodyne  
Possible amélioration du SNR

## ❑ SLS\_Id performances

- Résolution spatiale  $< 1 \text{ mm}$

*Frequency span = 150 GHz*

- Seuil de détection  $< \text{qq } 4\text{e-}17 \text{ W}$

*Soit, miroirs de type LMA <sup>1</sup> la contribution LRD est visible <sup>2</sup>*

*<sup>1</sup> TIS  $< 10 \text{ ppm}$ , <sup>2</sup> (SNR  $\sim 10$ , dans un environnement std de laboratoire)*

---

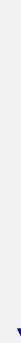
## ❑ Etapes futures - en cours

- Laser fibré -> laser diode  
balayage de fréquence **plus rapide** (x10?) & **plus large** (x4)
- Schéma de détection hétérodyne  
Possible amélioration du SNR

## ❑ Etapes futures (> 09/26)

- Simulation optique (Zemax) pour calibration photométrique
- Investigation de la répartition de speckle (port de détection)
- ....
- Campagne de mesure @ Virgo

**Thèse ARTEMIS / LAPP  
financée (CNRS MITI) @ 1/10/26**



Merci pour votre attention