

## Les activités du "stray light work group" de LISA

Michel Lintz, ARTEMIS / OCA

[michel.lintz@oca.eu](mailto:michel.lintz@oca.eu)

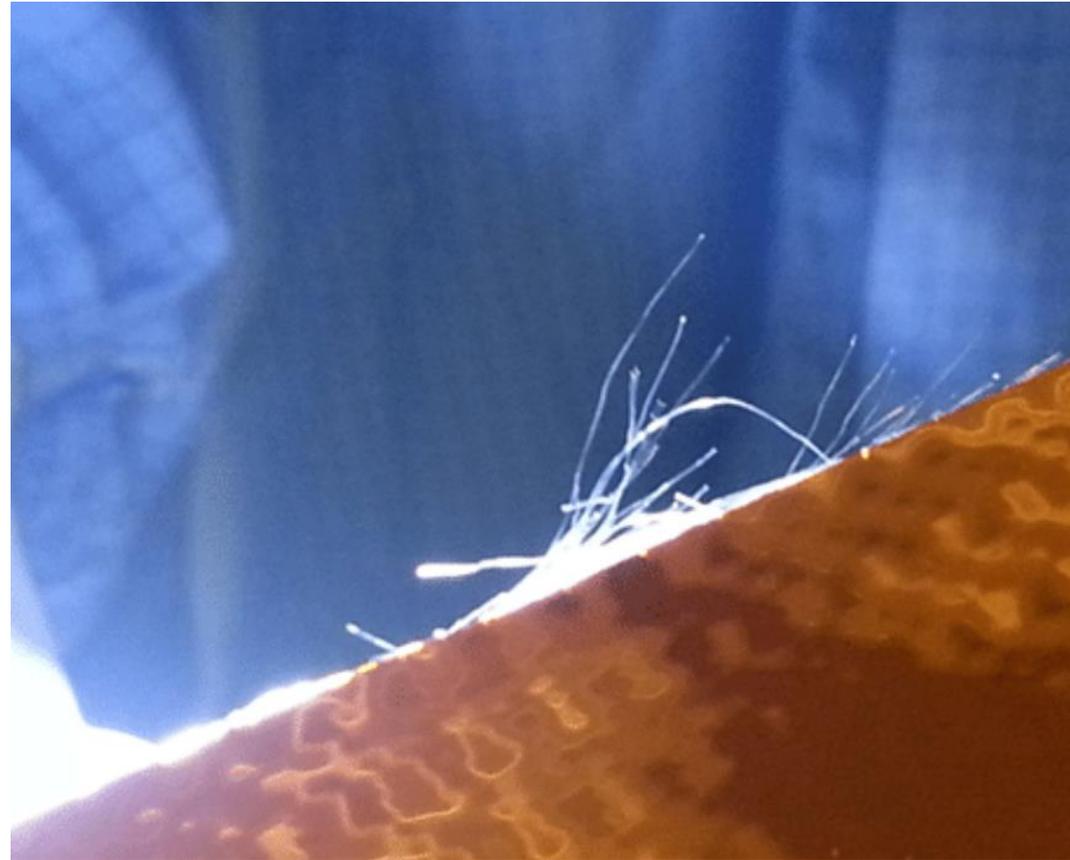
# Lumière parasite

"**Lumière parasite**" = lumière non souhaitée dans le schéma de l'expérience ou de la mesure

Présente dans beaucoup de situations

exemple: la mission d'astrométrie Gaia  
=> lumière parasite d'origine solaire

ici: lumière parasite incohérente

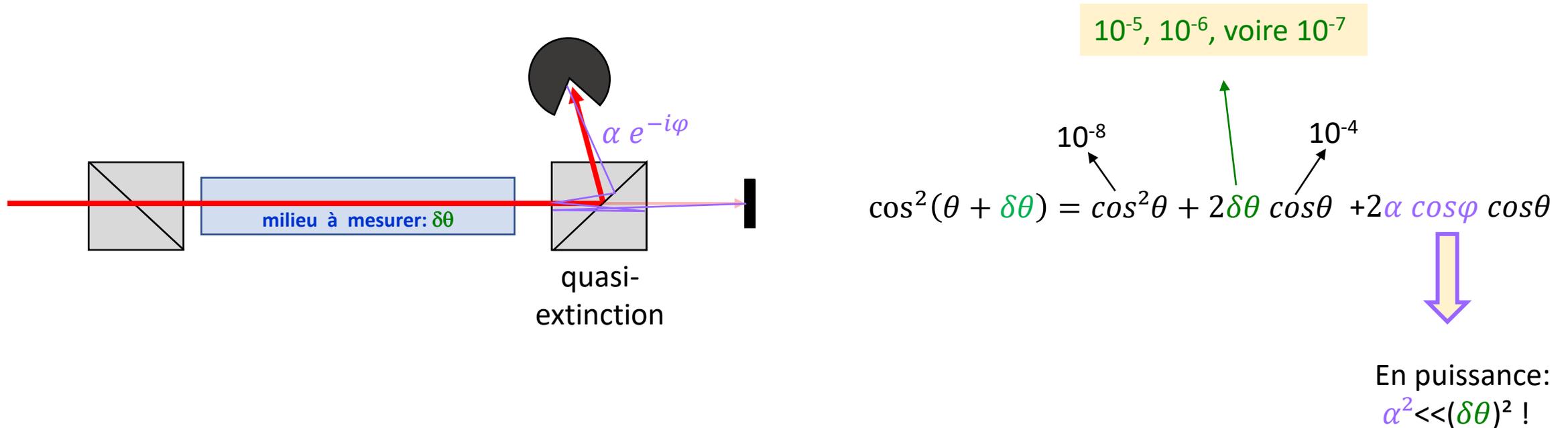


# Lumière parasite (cohérente)

"Lumière parasite" = lumière non souhaitée dans le schéma de l'expérience ou de la mesure

Présente dans beaucoup de situations

☹ Peut limiter les mesures de polarimétrie de haute précision/résolution



☹ Peut perturber les diodes de pompage des horloges atomiques

La propagation de faisceaux mesure les variations de la métrique

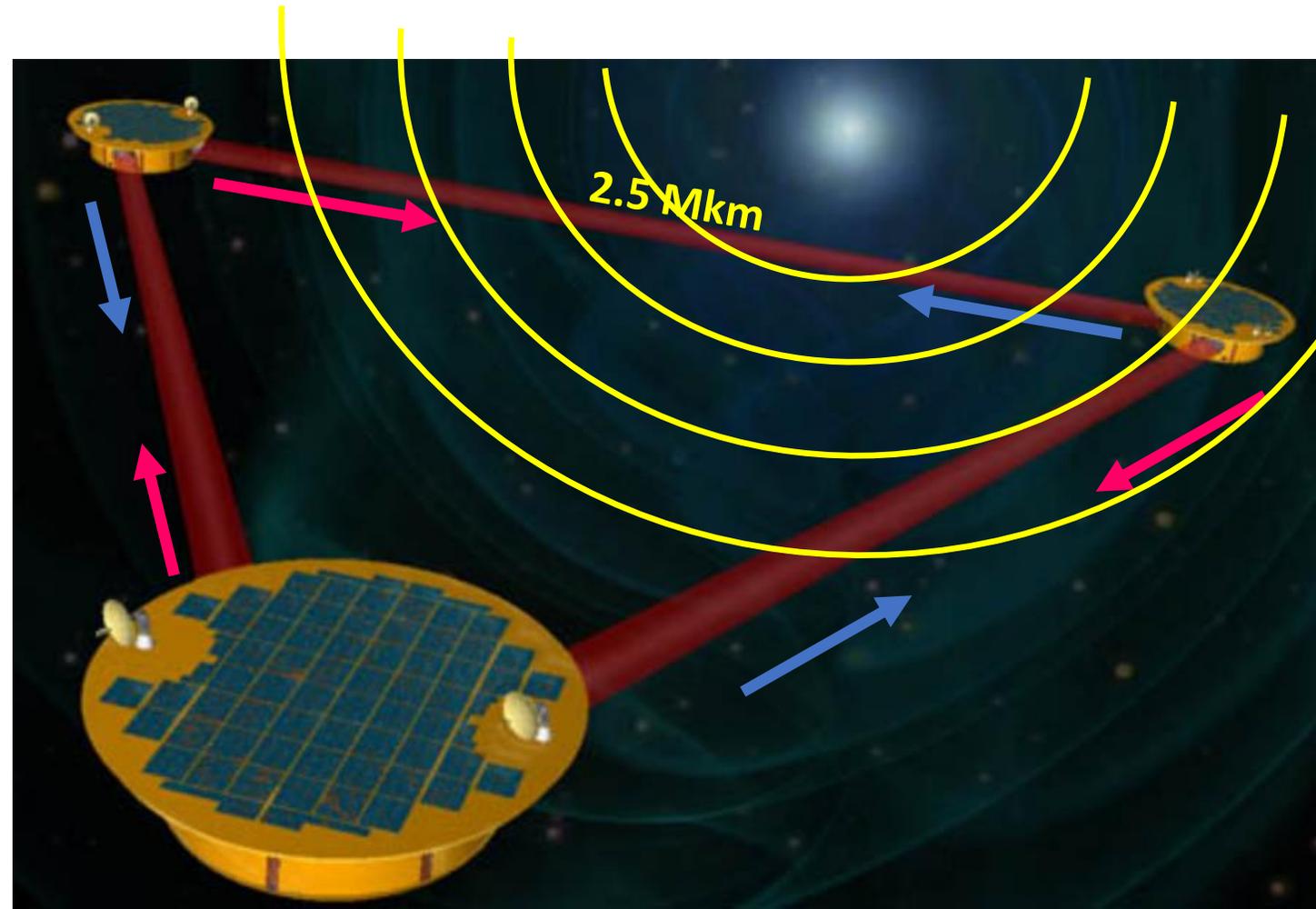
=> 6 mesures séparées

=> tenir compte des retards (8s) de propagation

- fréquences  $20\mu\text{Hz}$ - $1\text{Hz}$

- complémentaires des détecteurs terrestres

- détection hétérodyne



La propagation de faisceaux mesure les variations de la métrique

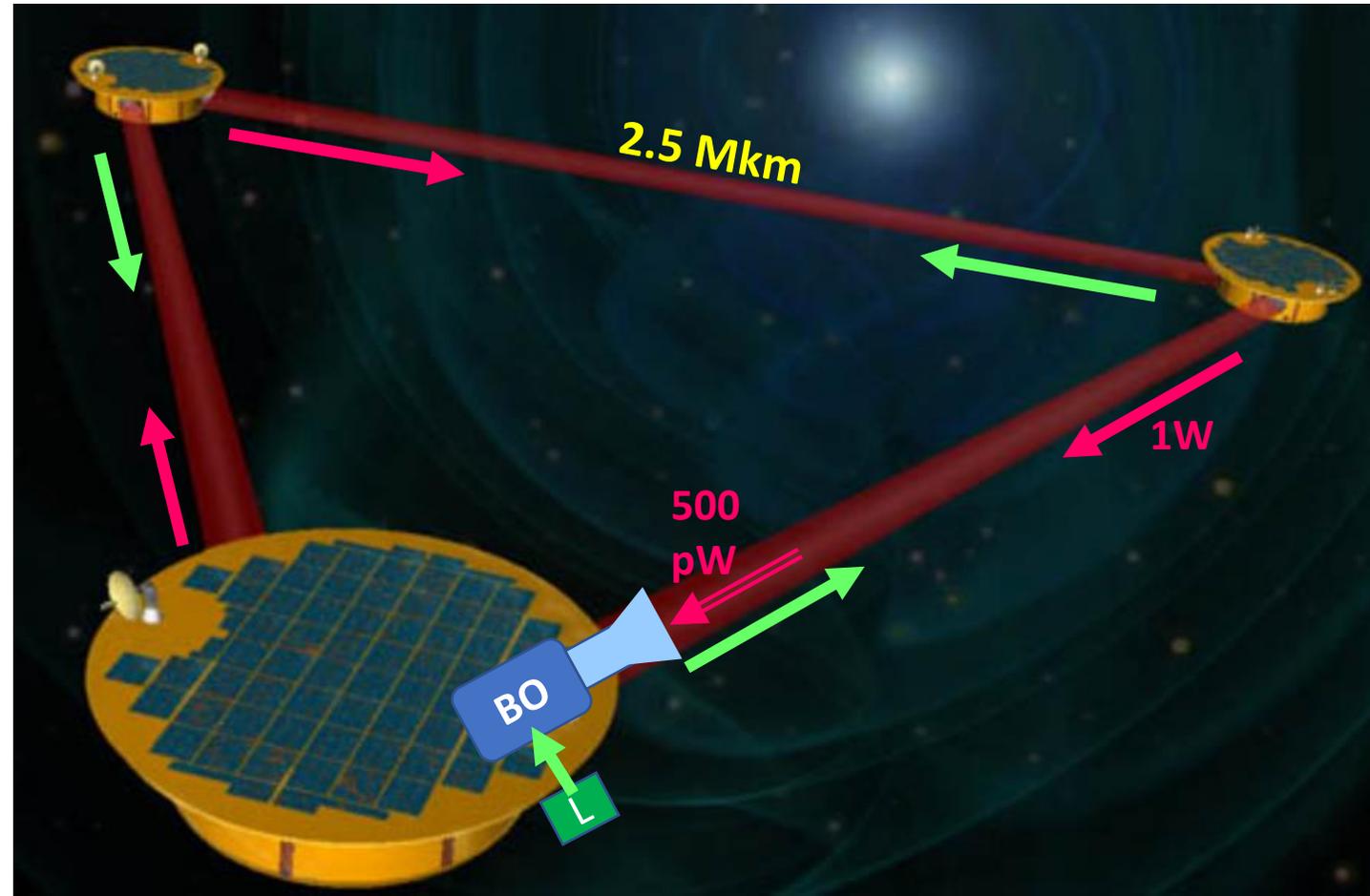
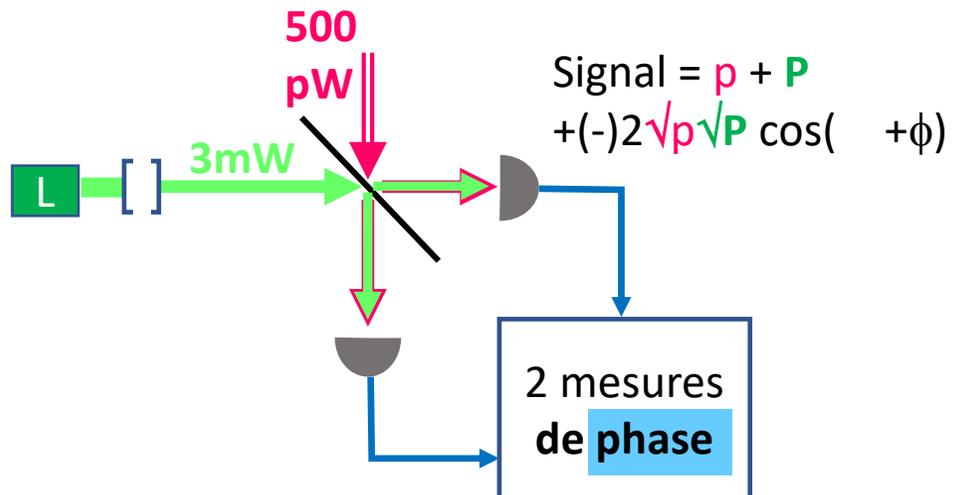
=> 6 mesures séparées

=> tenir compte des retards (8s) de propagation

- fréquences 20 $\mu$ Hz-1Hz

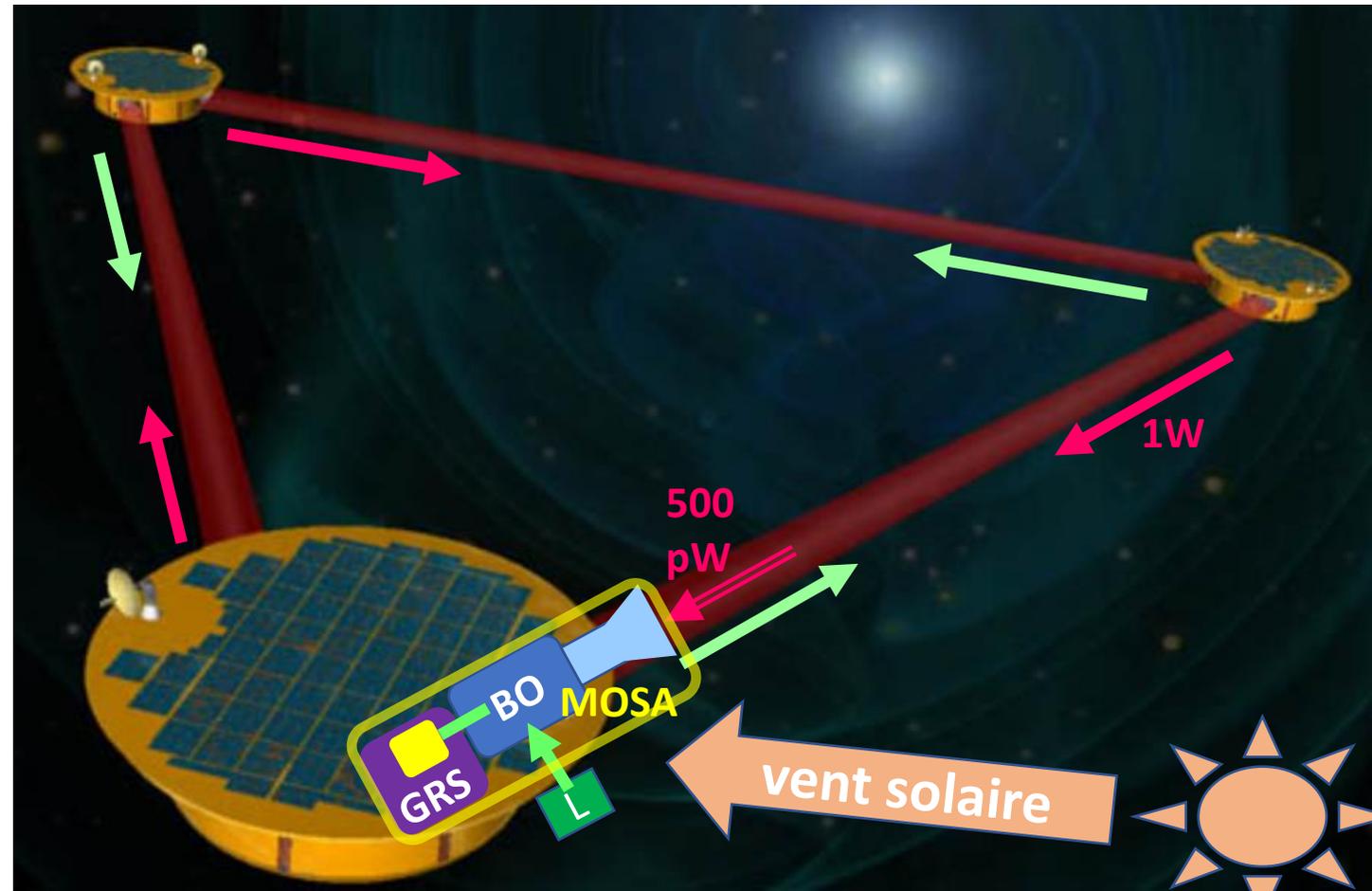
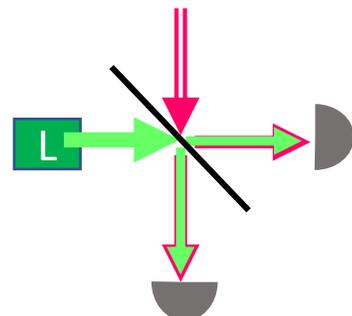
- complémentaires des détecteurs terrestres

- détection hétérodyne



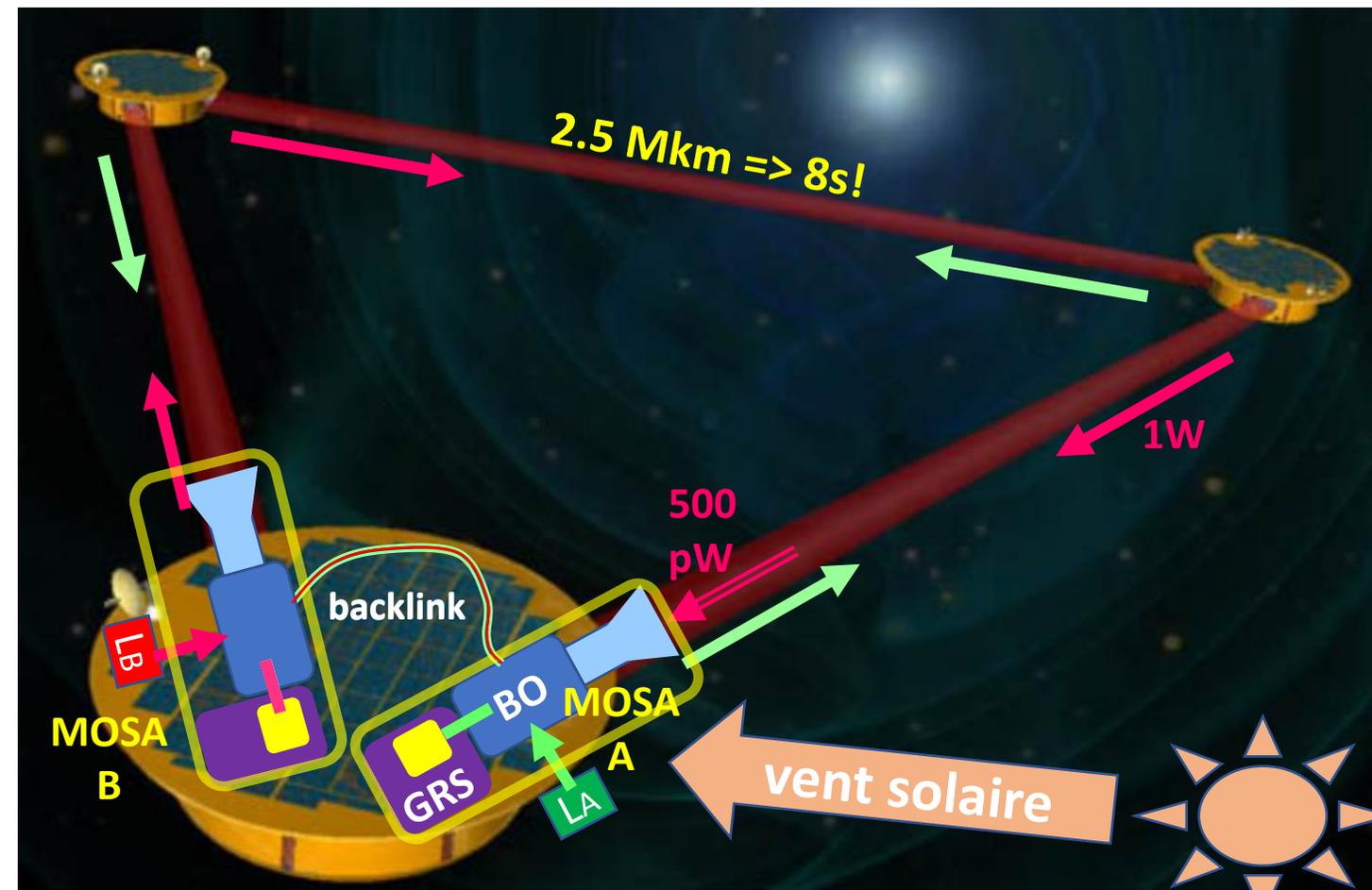
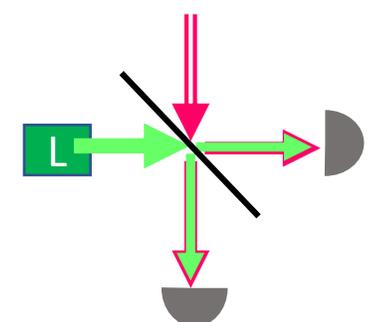
La propagation de faisceaux mesure les variations de la métrique

- => 6 mesures séparées
- => tenir compte des retards (8s) de propagation
- fréquences  $20\mu\text{Hz}$ - $1\text{Hz}$
- complémentaires des détecteurs terrestres
- détection hétérodyne
  
- 2x MOSA (moving optical subassembly) par satellite
- chaque MOSA intègre 3 interféros: "science", "Test Mass", et "reference"



- 2x MOSA (moving optical subassembly) par satellite
- chaque MOSA intègre 3 interféros: "science", "Test Mass", et "reference"
- 6 liens laser + TDI (time-delayed Interf.) réjection du bruit de fréquence des lasers

Signal =  $p + P$   
 $+(-) 2\sqrt{p}\sqrt{P} \cos(\omega t + \phi_{eff} - \phi)$



# Interférence hétérodyne: sensibilité (et difficultés!)

L'interférence hétérodyne

- est-elle différente de l'interférence homodyne?

non en principe, **mais oui en pratique (signal en bande RF, bas bruit)**

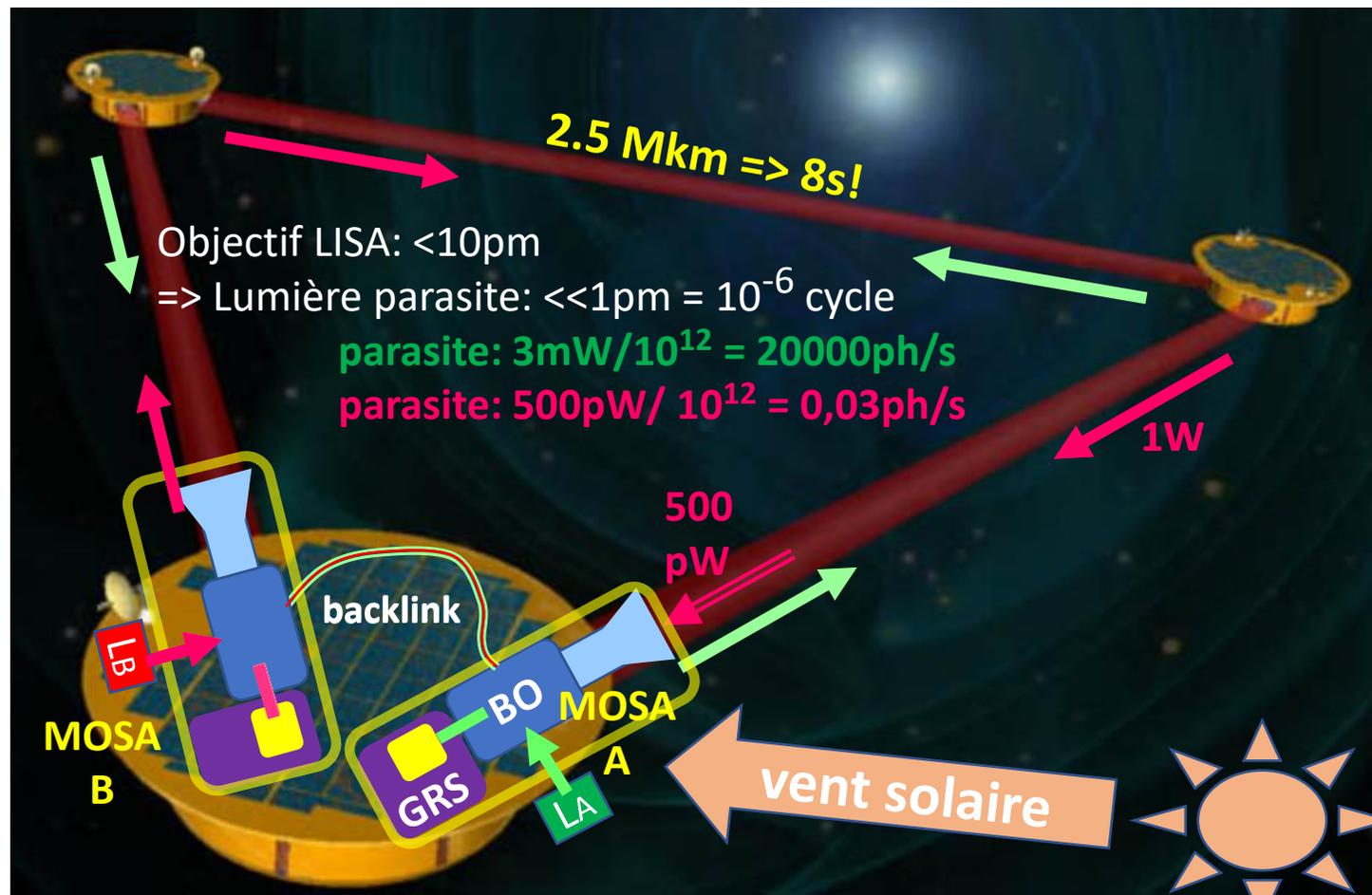
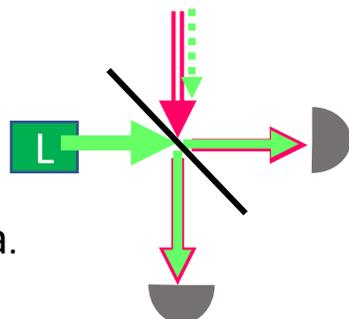
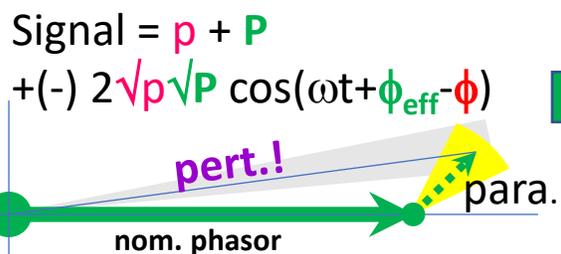
- détection sensible. A un seul photon?? Oui, peut mesurer **deux** photons (PhysRevD.99.022001 : 1 photon/100s!)

mais => très **sensible.. à la lumière parasite!**

- 2x MOSA (moving optical subassembly)  
par satellite

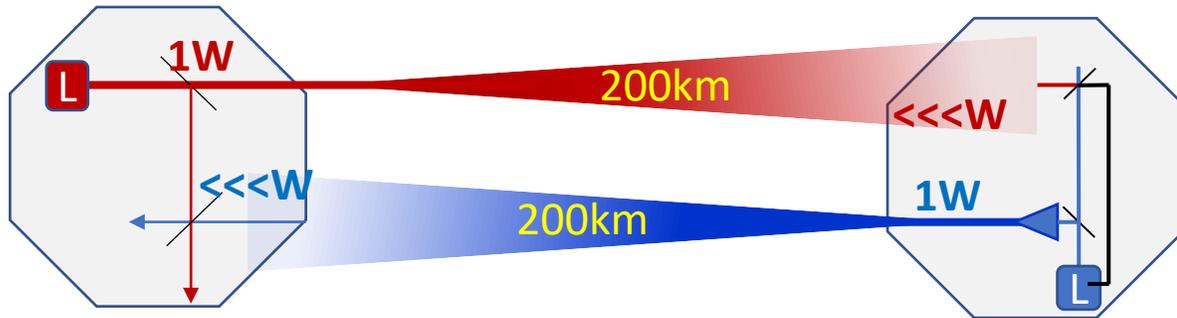
- chaque MOSA intègre 3 interféros:  
"science", "Test Mass", et "reference"

- 6 liens laser + TDI (time-delayed Interf.)  
réjection du bruit de fréquence des lasers



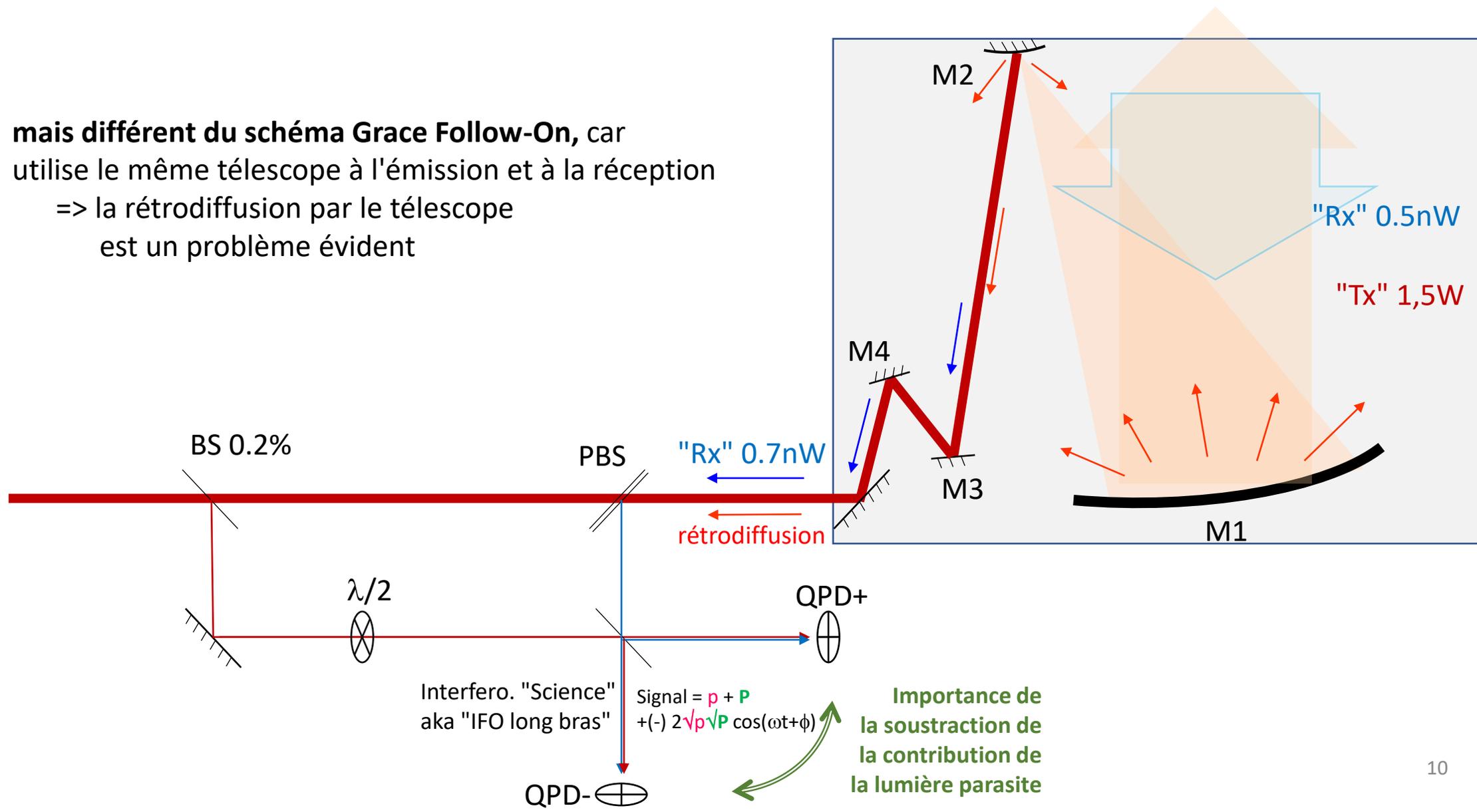
# Le schéma "transpondeur" de LISA

proche du transpondeur type GRACE Follow-On...



# Le schéma "transpondeur" de LISA

mais différent du schéma **Grace Follow-On**, car  
utilise le même télescope à l'émission et à la réception  
=> la rétrodiffusion par le télescope  
est un problème évident



# Lumière parasite dans LISA

problématiques lumière parasite dans LISA:

- évaluer l'importance et les conséquences de la lumière parasite
  - Tx => IFO "Long Bras"
  - Rx => IFO "Long Bras" (!)
  - Tx => "Constellation Acquisition Sensor" (contribution incohérente)
  - étoiles, planètes => IFO "Long Bras", CAS (incohérent)
  - réflexions parasites, transmissions parasites
  - et bien d'autres (halo) ...
- prévoir les protections contre la lumière parasite
  - efficacité de réjection
  - facilité d'intégration
  - encombrement, poids
- préparer/réaliser des mesures, caractérisations, au stade de l'intégration MOSA ("Stray Light OGSE")

# "Stray Light Work Group"

Un des groupes de travail du LISA Instrument Group (Workgroup chairs: Gudrun Wanner, ML)

## Contributions

- Allemandes: Albert Einstein Institut (Hanovre)
- Britanniques: Univ. Glasgow & UK Astronomy Tech. Center, Edinburgh
- US: NASA Goddard Greenbelt; U. Florida, Gainesville
- *ESA/ESTEC, Noordwijk*

## **Contribution Française:**

APC (Univ. Paris Diderot)

ARTEMIS (Observatoire de la Côte d'Azur, CNRS et UCA Nice)

Institut Fresnel (Marseille)

LMA (Univ. Claude Bernard, Lyon)

*CNES (P. Etcheto, D. Faye)*

Expérience passée avec Virgo / LIGO

# SLWG : Différents travaux réalisés

- AEI** (*fibres de "backlink" (phasemètre)*)
- rétrodiffusion Rayleigh par une fibre optique ( $\frac{\lambda}{L}$  effet dominant), effet du rayonnement spatial, soustraction par détection équilibrée
  - défauts de polarisation (sur LISA PathFinder)
  - modélisation de la propagation/diffraction
- APC**
- calcul (simulations sous FRED)
    - de la rétrodiffusion dans le Télescope => IFO long bras (cohérente-incohérente)
    - de la rétrodiffusion vers le CAS ( $\frac{\lambda}{L}$ )
  - notes techniques
- ARTEMIS**
- étude exp. de la rétrodiffusion cohérente (composant, TS, Back-Link)
    - Par une surface ([doi.org/10.1117/12.2536200](https://doi.org/10.1117/12.2536200))
    - Par une fibre optique
  - modélisation de la (retro)diffusion cohérente
  - modèle détaillé de la diffusion (+/- cohérente!) due aux météorites ([doi.org/10.1117/1.JATIS.6.4.048005](https://doi.org/10.1117/1.JATIS.6.4.048005)) par le Modèle de Peterson
- Inst. Fresnel**
- mesure résolue avant/arrière de la rétrodiffusion par un composant, en lumière faiblement cohérente
  - simulation numérique des résultats d'ARTEMIS de la rétrodiffusion par une surface
- LMA** Tests de matériaux
- NASA GSFC** (*Télescope*)
- lumière diffusée sur les miroirs du télescope: rugosité, contamination, ghosts
- Univ. Glasgow** (*Banc Optique*)
- lumière parasite dans les divers éléments du banc optique, dans la fibre de backlink
  - beam dumps appropriés (problématiques différentes suivant les endroits)
- Univ. Floride** - modélisation de la propagation/diffraction

# Plan

**Etude de la rétrodiffusion par une surface, par Interférométrie Michelson (ARTEMIS)**

**Etude de la rétrodiffusion par un composant, par Interférométrie en lumière peu cohérente (Inst. Fresnel)**

**Rétrodiffusion par la fibre de back-link (Albert Einstein Intitut)**

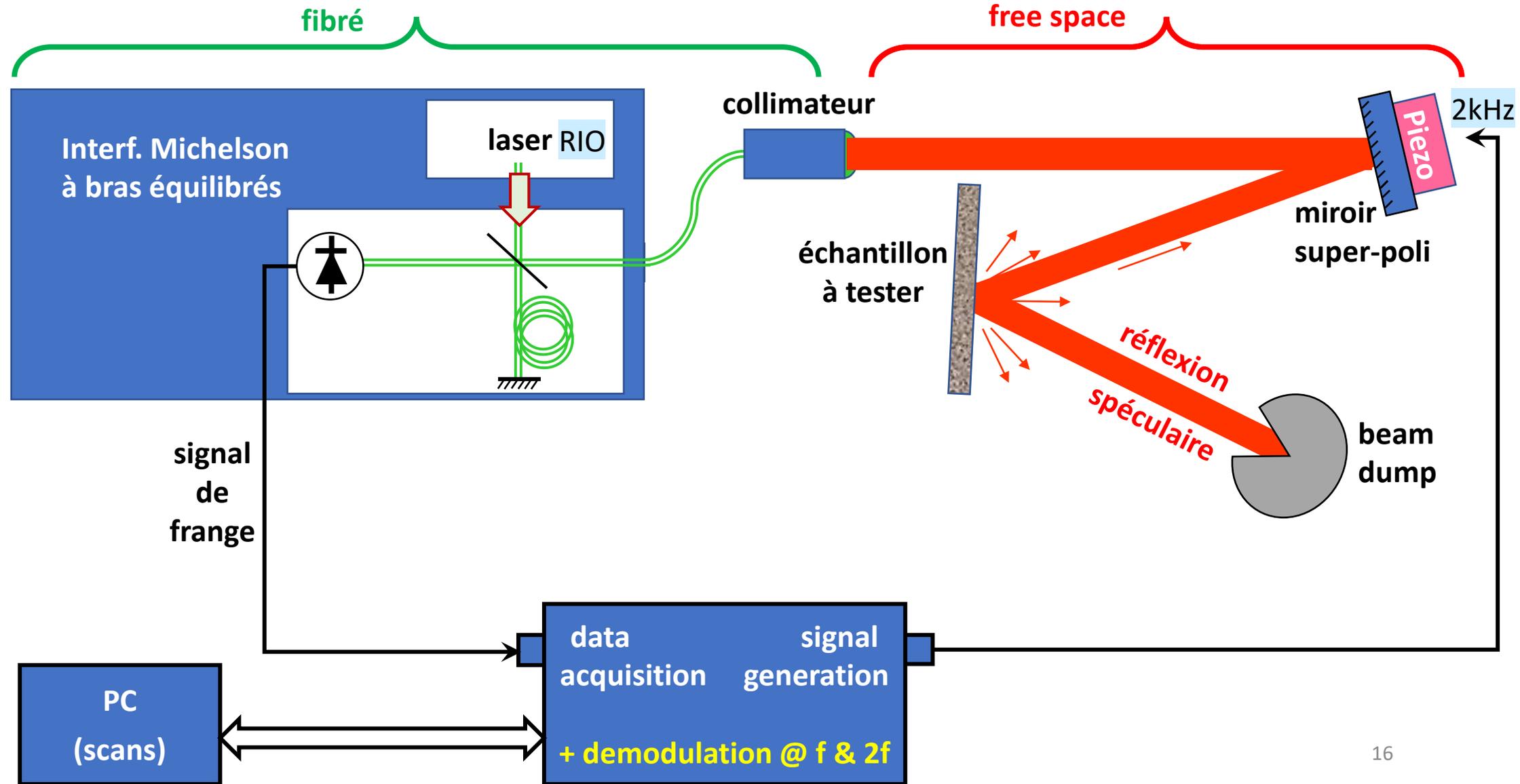
**Calculs de lumière parasite dans un interféromètre: méthode approchée (ARTEMIS)**

**Perspectives**

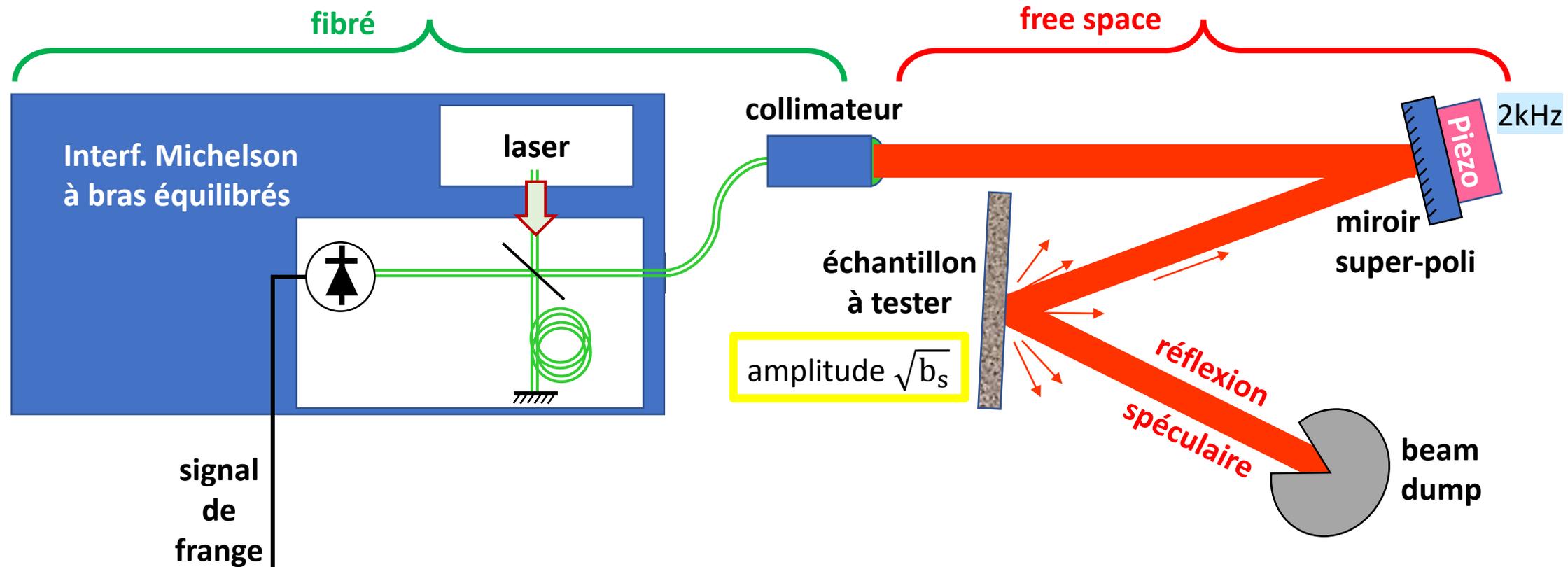
# Etude de la rétrodiffusion par une surface par Interférométrie Michelson

thèse Khodnevych, [tel.archives-ouvertes.fr/tel-03177562v1](https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03177562v1)

# Interférométrie Michelson: schéma de démodulation



# Interférométrie Michelson: schéma de démodulation



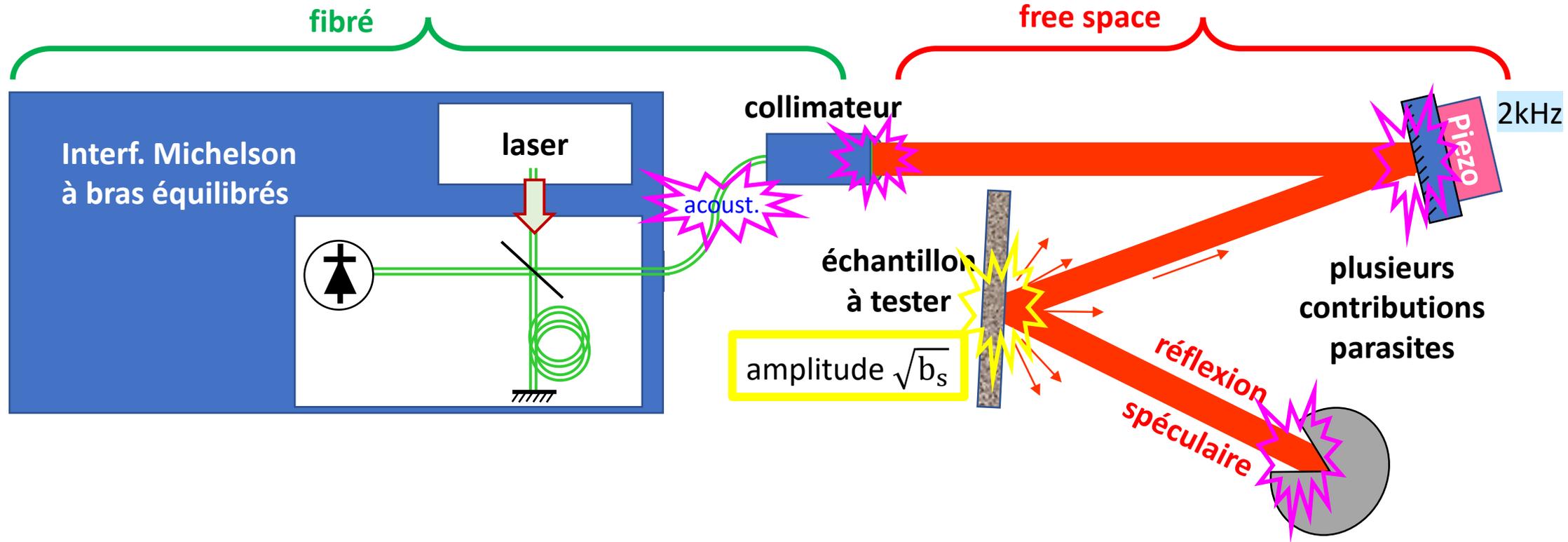
signal de frange

$$\frac{I_{\text{Laser}}}{2} \sqrt{b_s} \cos(\Delta\phi_s)$$

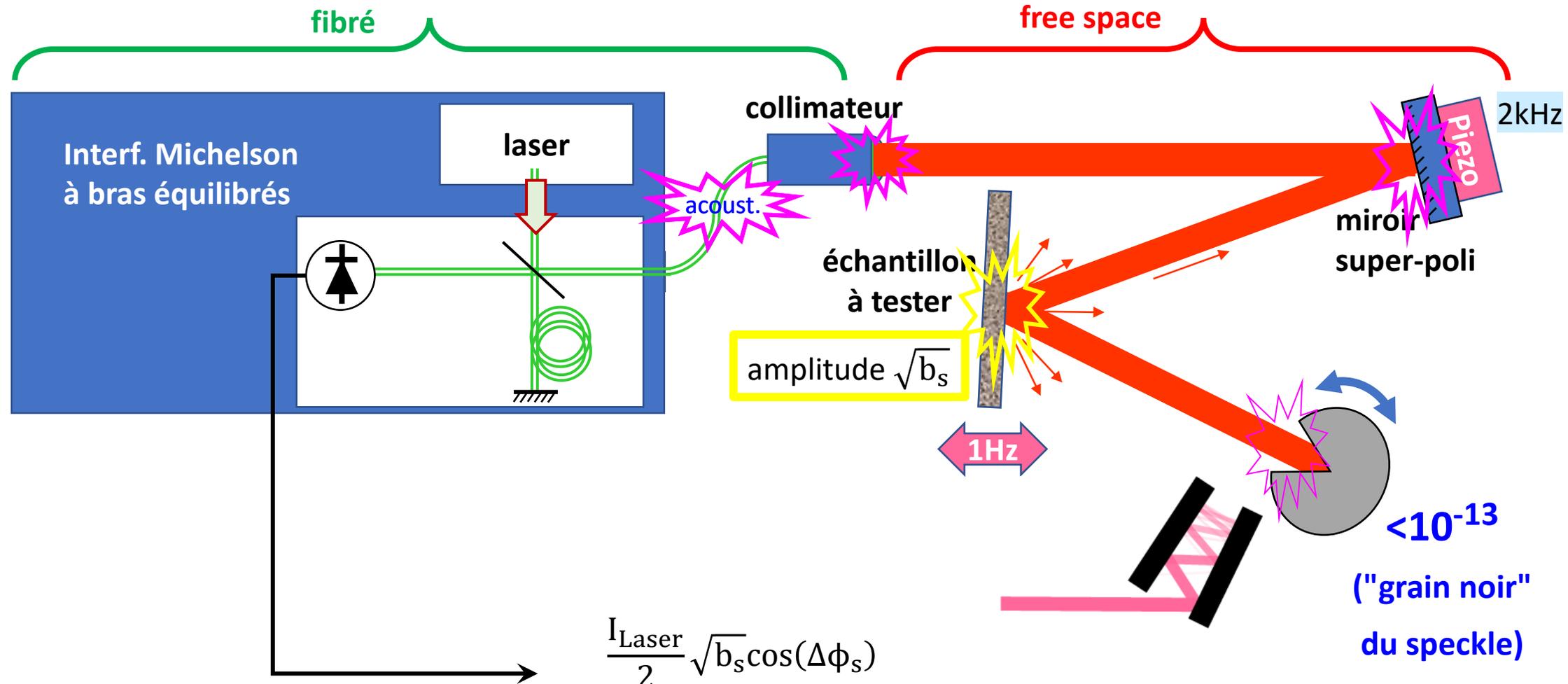
$$\sqrt{b_s} = \sqrt{\left(\frac{R_1}{2J_1(2\pi\delta_{PM})}\right)^2 + \left(\frac{R_2}{2J_2(2\pi\delta_{PM})}\right)^2} \frac{1}{I_L/2}$$

$R_1$  ( $R_2$ )  
démodulation  
à  $f$  (à  $2f$ )

# Contribution nominale, contributions parasites

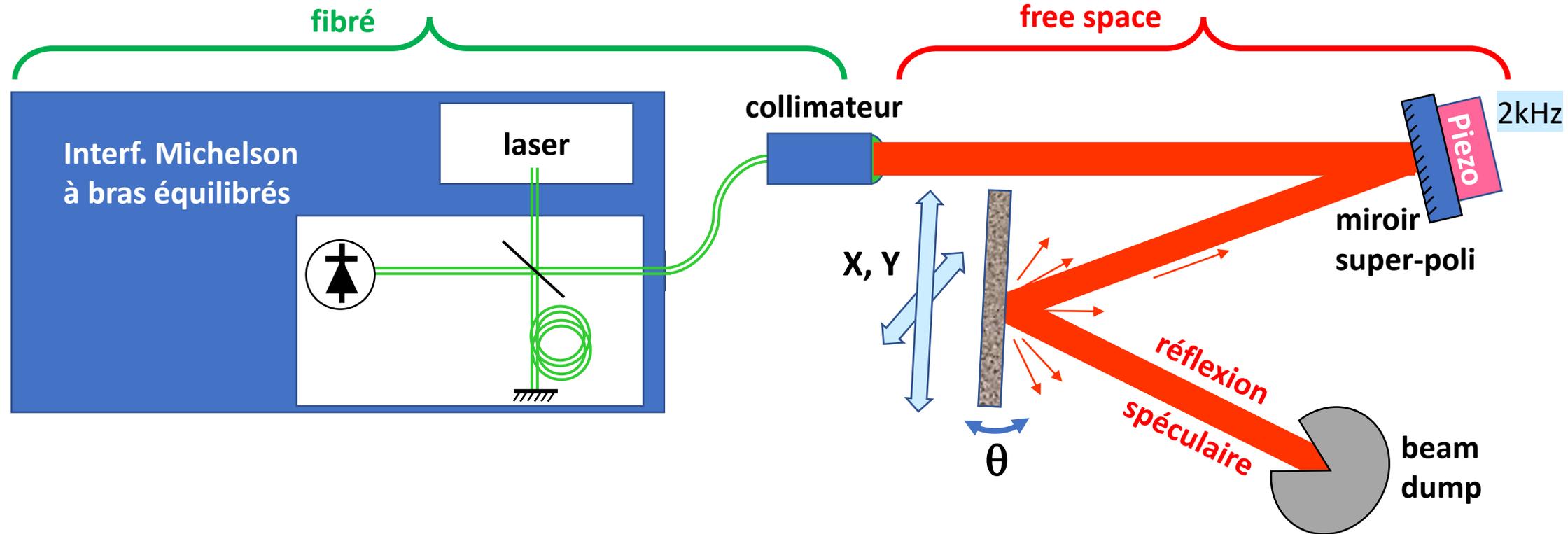


# Contribution nominale, contributions parasites

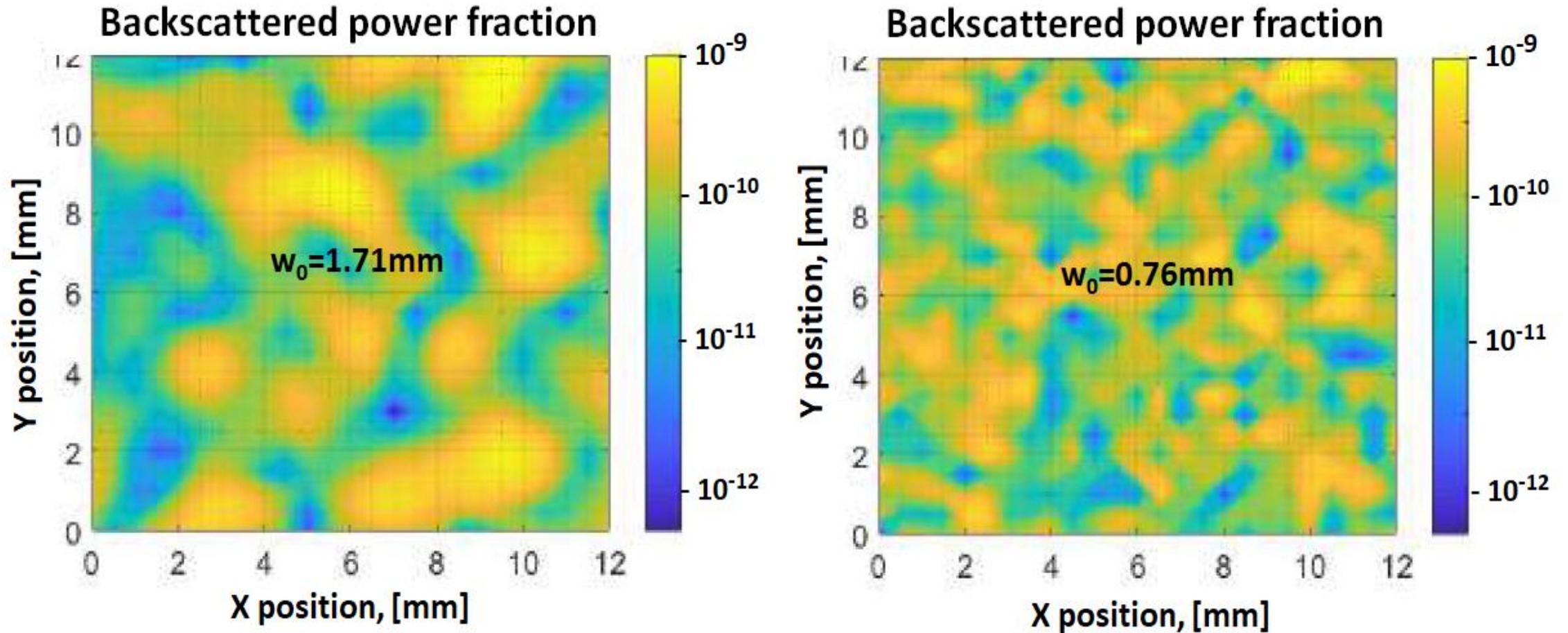


$$\sqrt{b_s} = \sqrt{\left(\frac{R_1}{2J_1(2\pi\delta_{PM})}\right)^2 + \left(\frac{R_2}{2J_2(2\pi\delta_{PM})}\right)^2} \frac{1}{I_L/2}$$

# Propriétés de speckle: scans en X-Y et en tilt



# Propriétés de speckle: scans X-Y

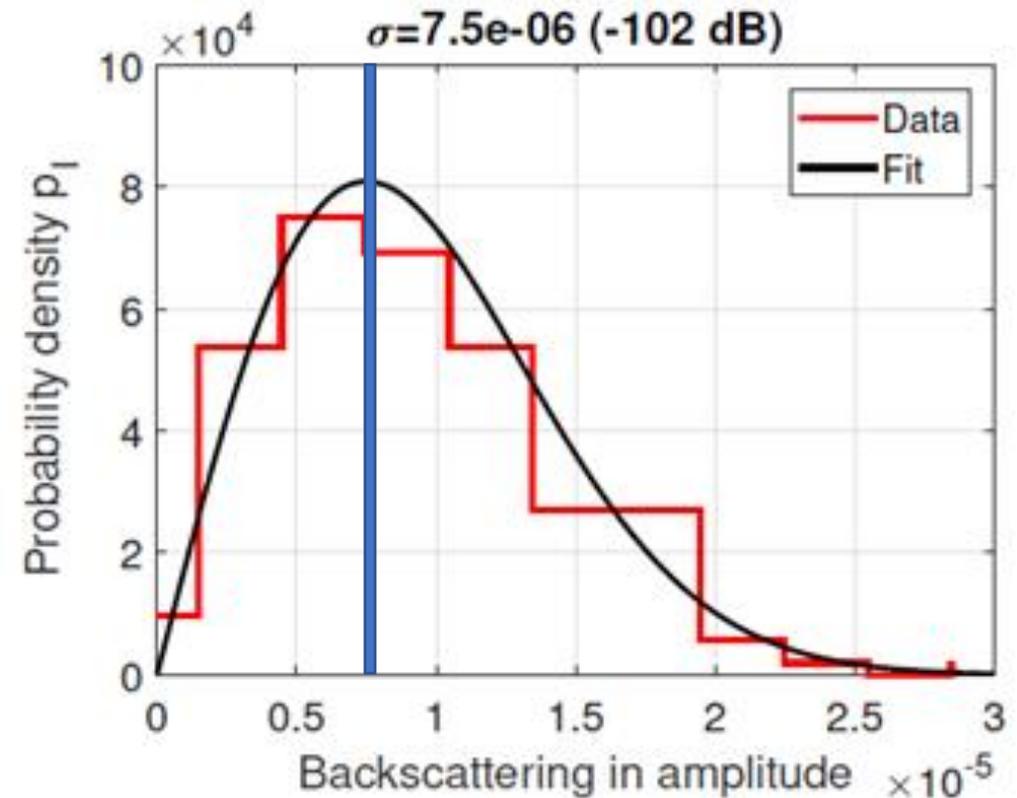
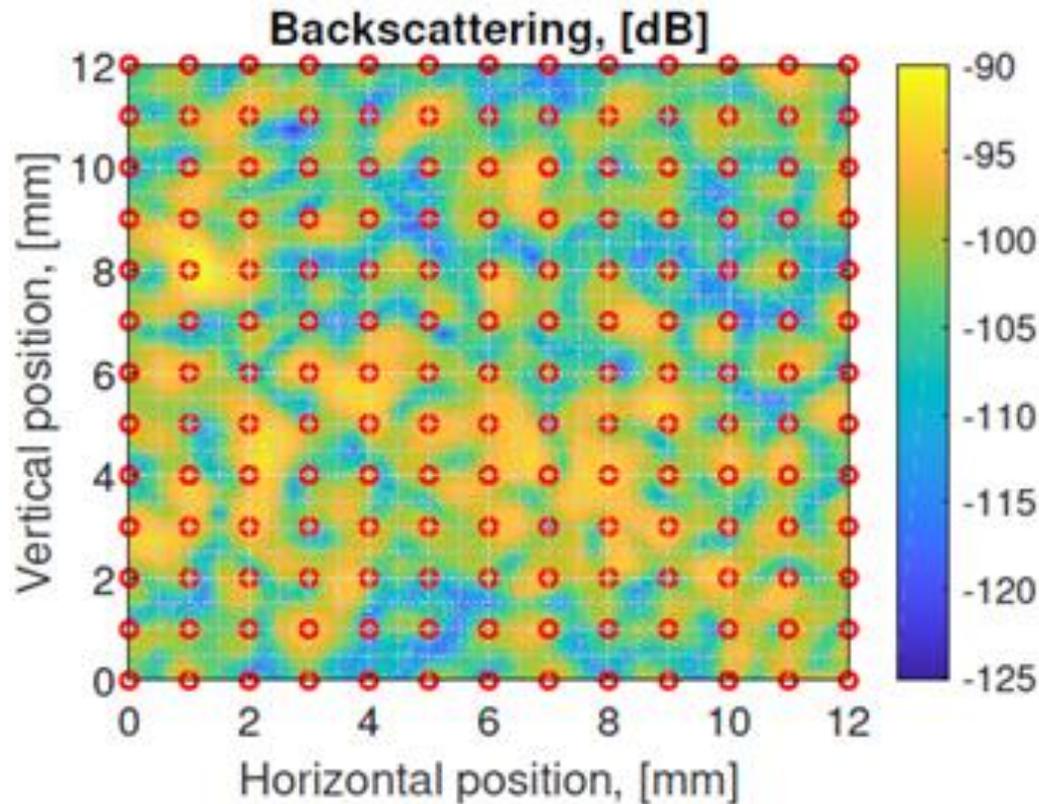


**Taille d'un "grain" de speckle  $\sim$  waist du faisceau (intégration sur la dimension du faisceau)**

Ici, miroir de qualité médiocre (rugosité 150 Angstroms)  $\Rightarrow$  "grands" signaux (et signaux "simples")

incidence  $14^\circ$ , fixe

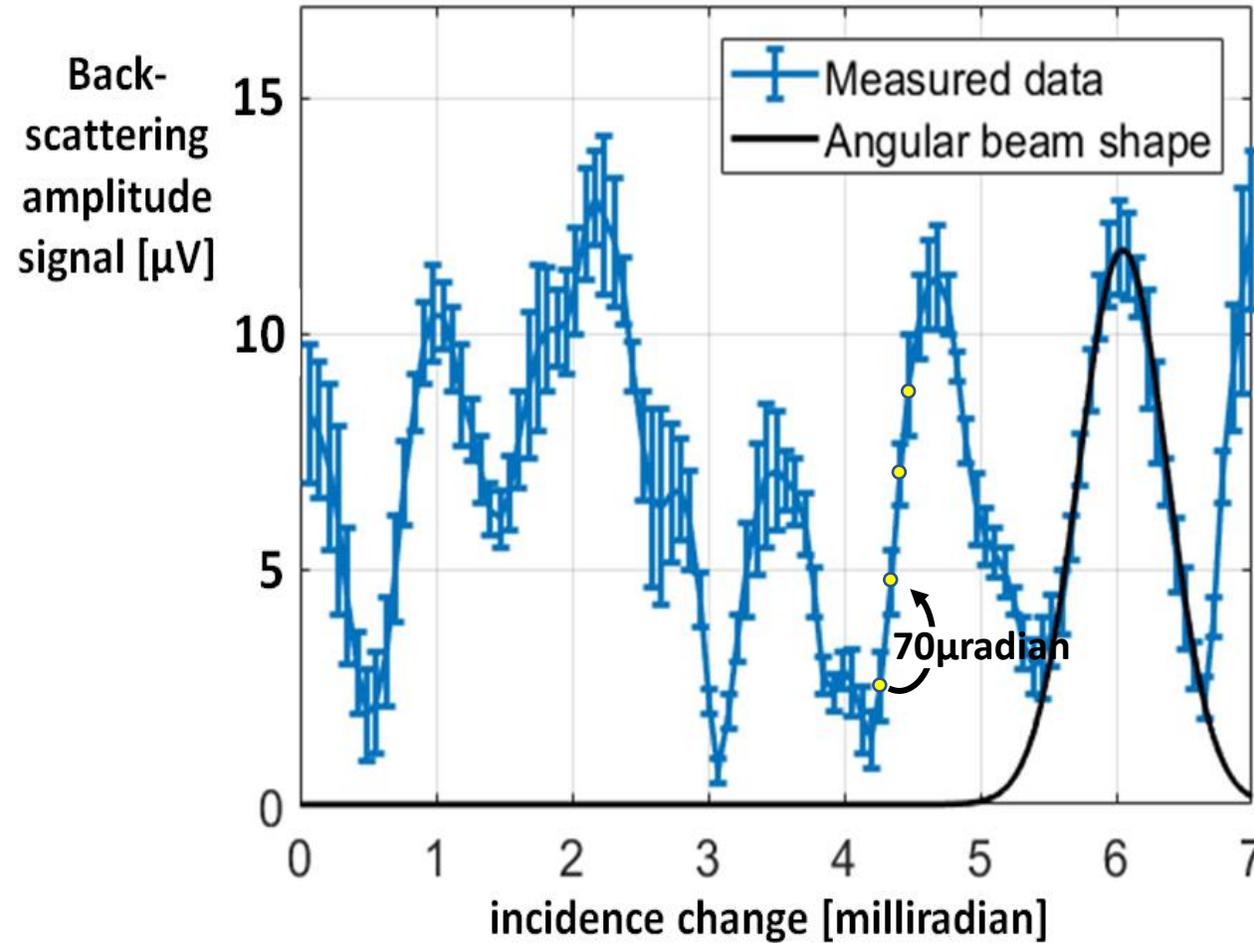
# Propriétés de speckle: distribution dans les scans X-Y



Statistique attendue et observée: distribution de Rayleigh,  $\frac{A}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{A^2}{2\sigma^2}\right)$

=> prévoir une marge pour les écarts à la valeur moyenne?

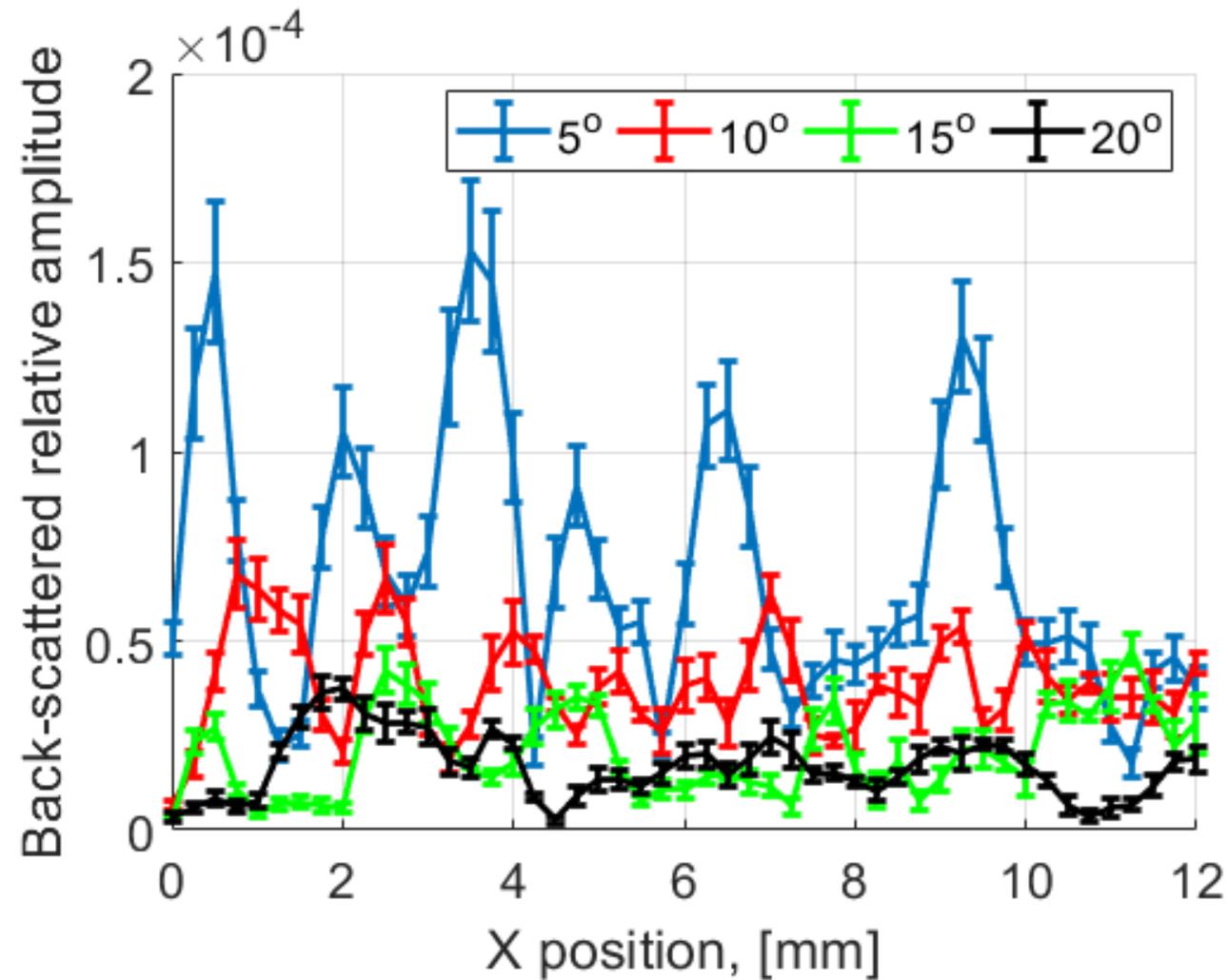
# Propriétés de speckle: scans angulaires (*petite échelle*)



Dépendance très rapide à l'angle d'incidence:

l'échelle est la "divergence"  $\lambda/\pi D$  (ici 0,65mradian TBC pour spot 2x0,76mm)

# Propriétés de speckle: scans angulaires (*grande échelle*)



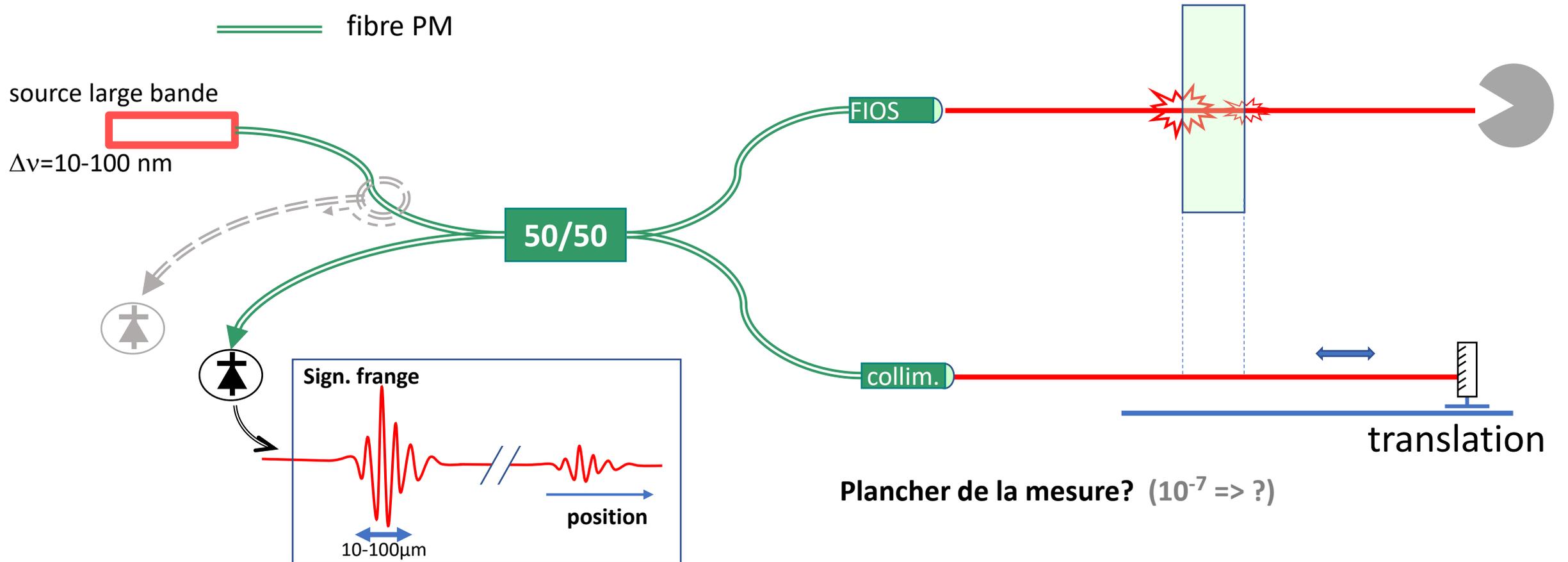
dépendance vs incidence  
attendue pour  
un poli optique

# **Etude de la rétrodiffusion par un composant par Interférométrie en lumière peu cohérente**

Imran Khan et al, Conf ICSO, [whova.com/portal/webapp/isco\\_202103/Agenda/1410041](http://whova.com/portal/webapp/isco_202103/Agenda/1410041)

# OLCR: Optical Low Coherence Reflectometry

**Methode classique: OLCR** optical low-coherence reflectometry (déjà pratiquée à l'Institut Fresnel),  
teste les "composants à 2 faces" !  
=> "échos" des différents retours optiques



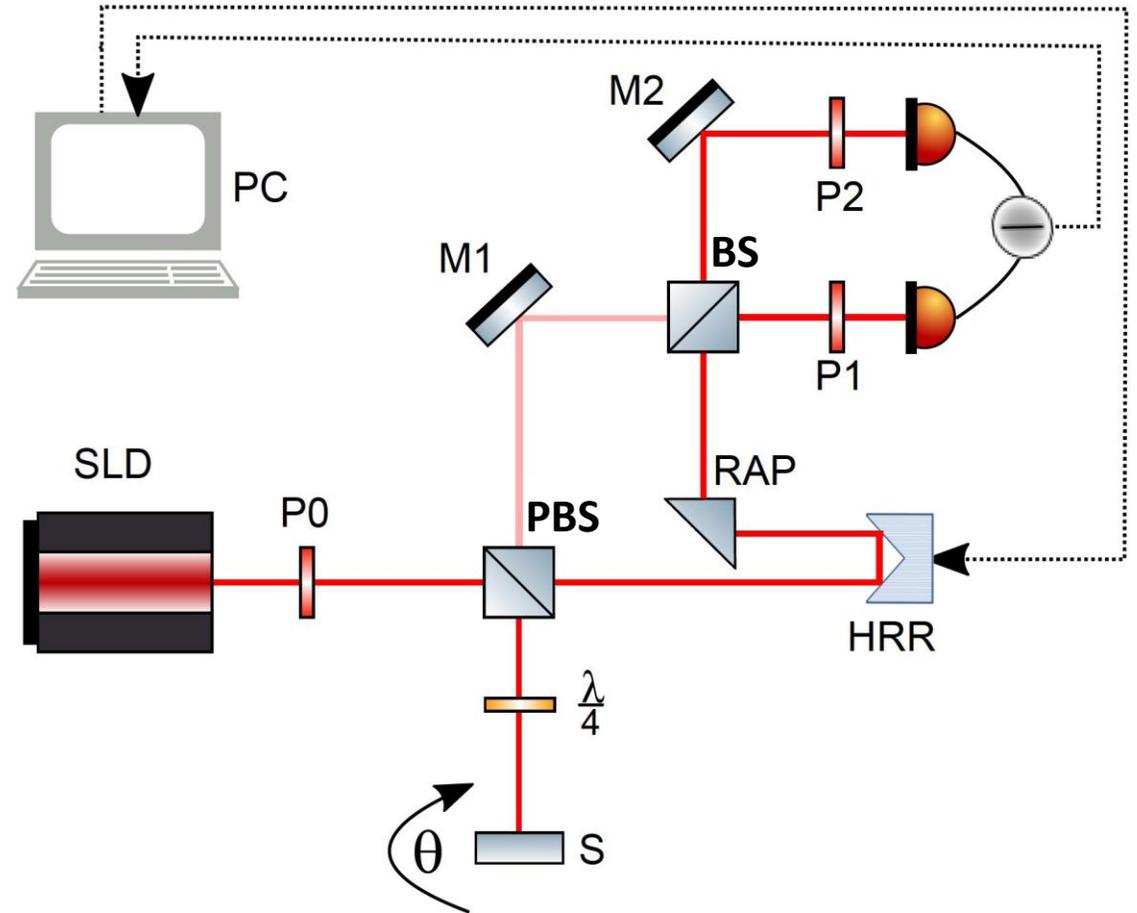
# OLCR: Optical Low Coherence Reflectometry

Configuration Mach-Zehnder

Mesure différentielle: Nirvana Thorlabs

Ajustement de la puissance par polariseur P0

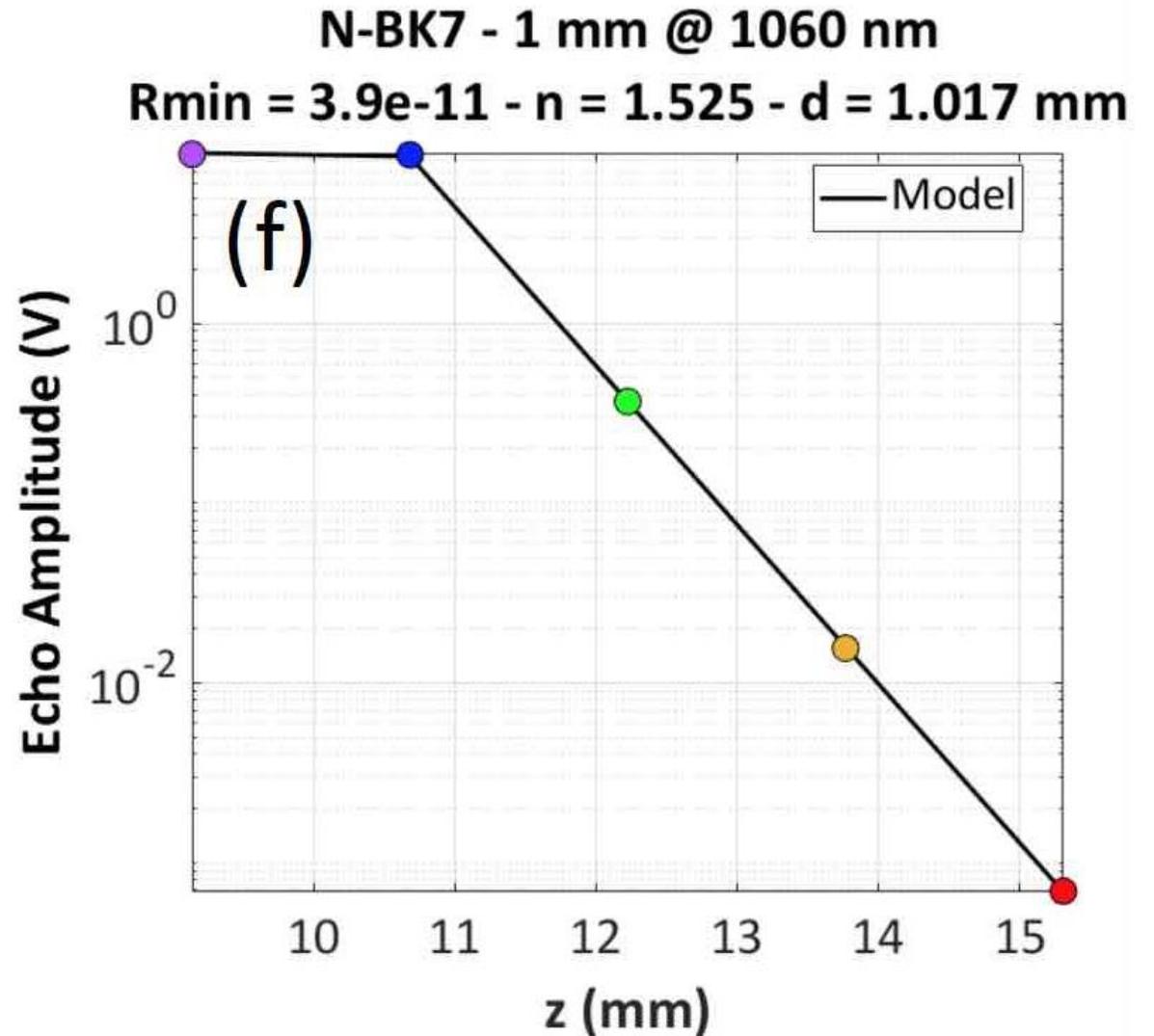
Filtrage spectral autour de la fréquence signal



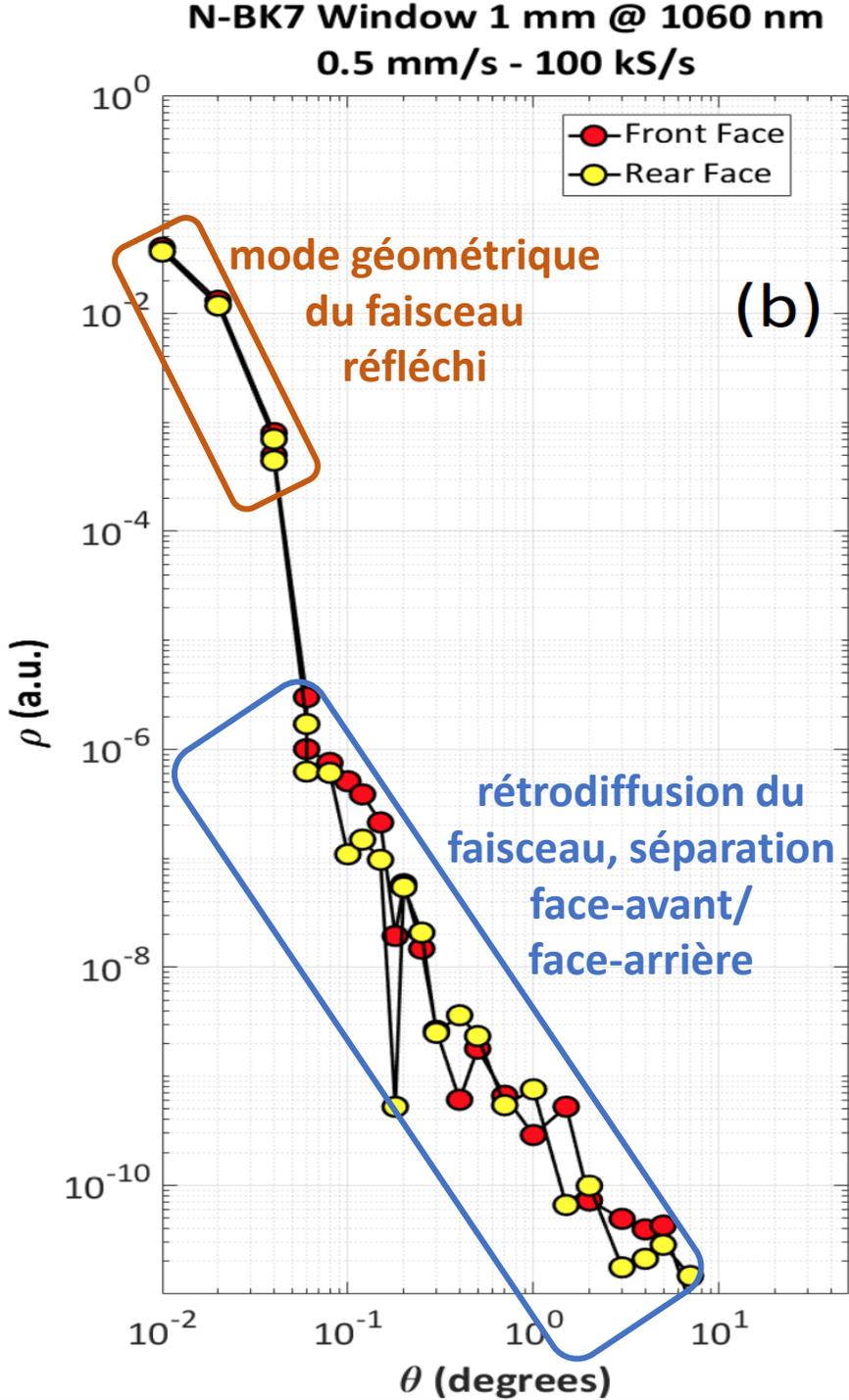
# OLCR: Optical Low Coherence Reflectometry

Test du montage: lame BK7 à incidence normale

Après le premier écho, échos successifs attendus

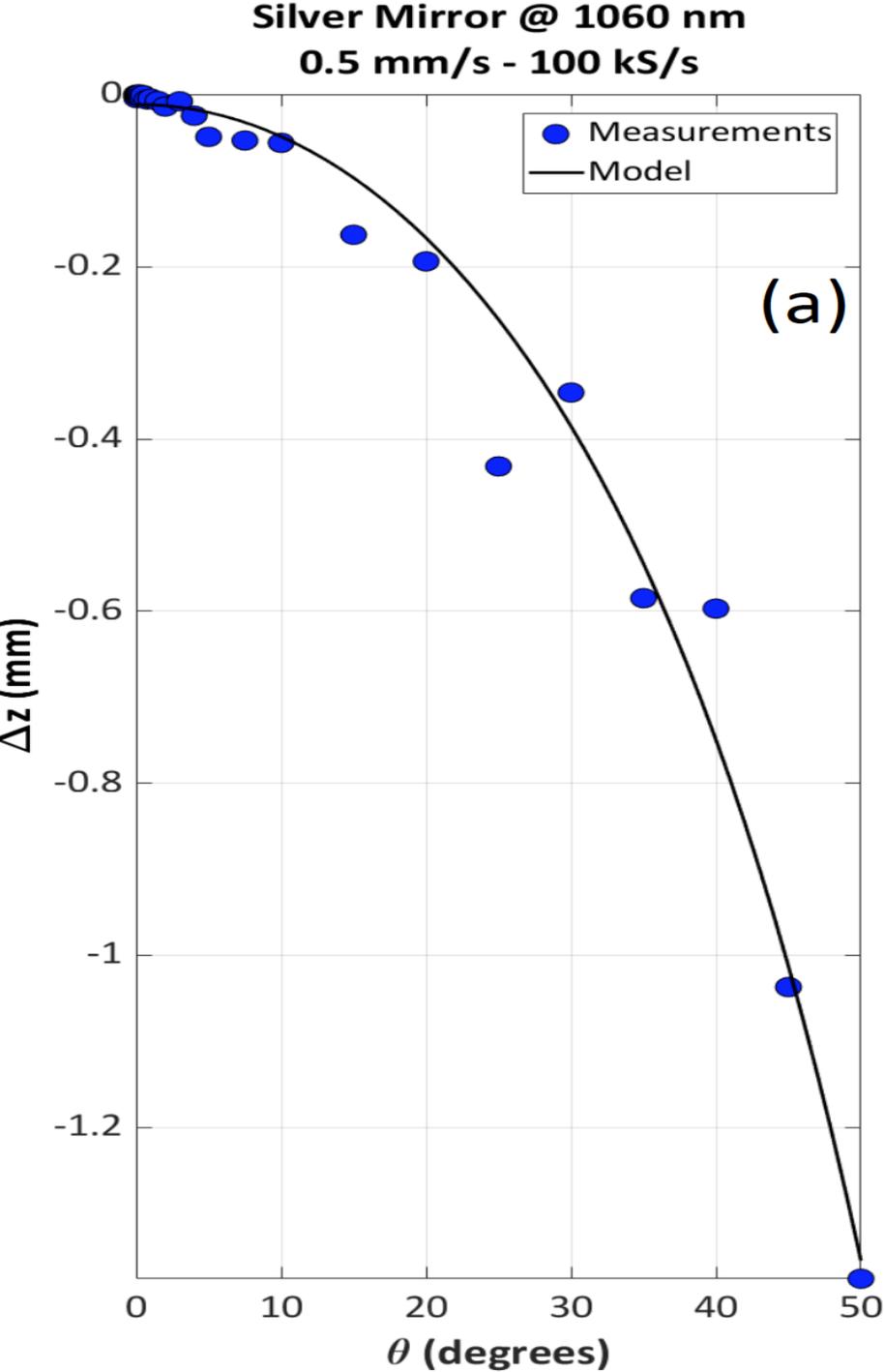


# Low Coherence Reflectometry



Enregistrement du premier et du 2ème écho,  
en tournant progressivement l'échantillon

# Low Coherence Reflectometry

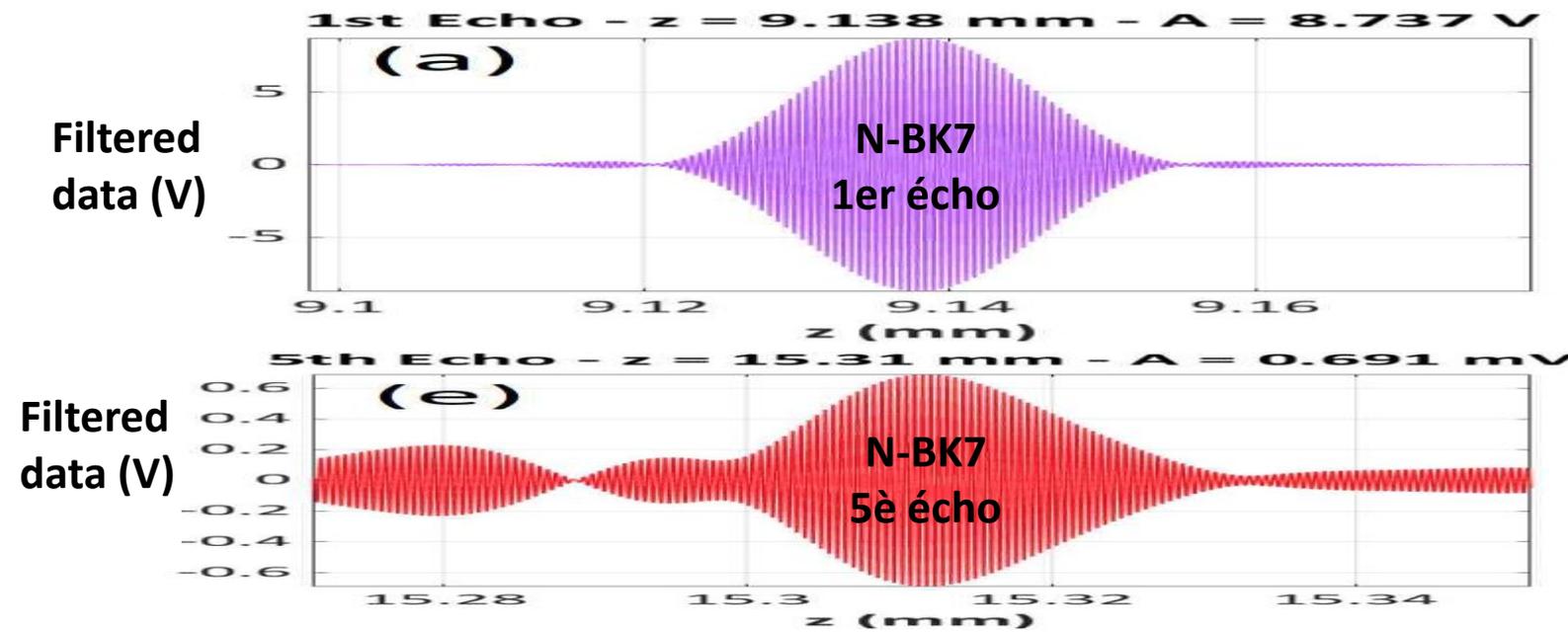


Restitution de la position de l'écho (speckle?)

Effets de la dispersion dans le matériau

Plancher de la mesure vers  $10^{-11}$

Améliorations attendues  $\Rightarrow 10^{-13}$  ?



# Rétrodiffusion par la fibre de back-link

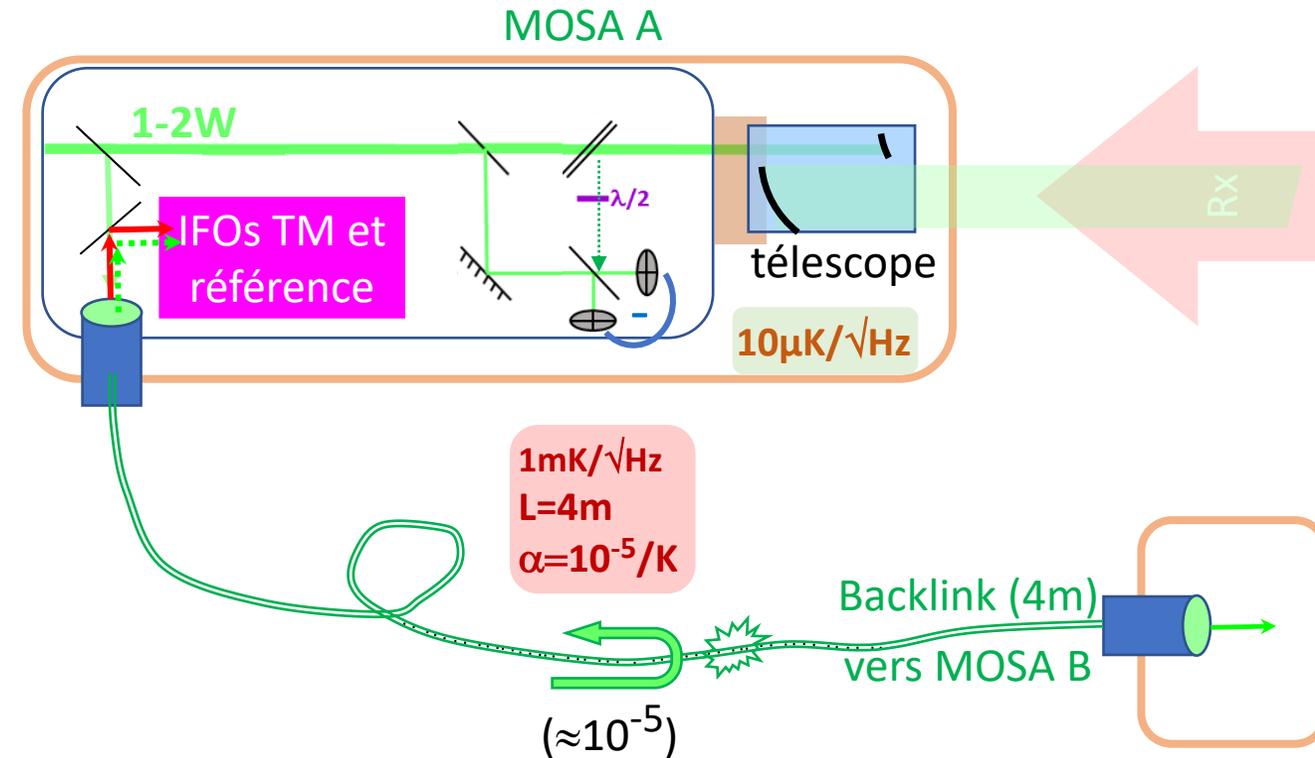
K. Isleif et al, CQG [35](#) (2018) 085009

Etude de l'endommagement par rayonnement  
=> pas d'effet sur la rétrodiffusion ☺

Recherche d'une configuration minimisant  
la lumière parasite

Recherche d'une fibre à faible rétrodiffusion  
=> gain par 10 ( $10^{-5} \Rightarrow 10^{-6}$ ) ☺

*Speckle et corrélations*



$3\text{pm}/\sqrt{\text{Hz}}$  dans (interféros Test Mass et Ref.)

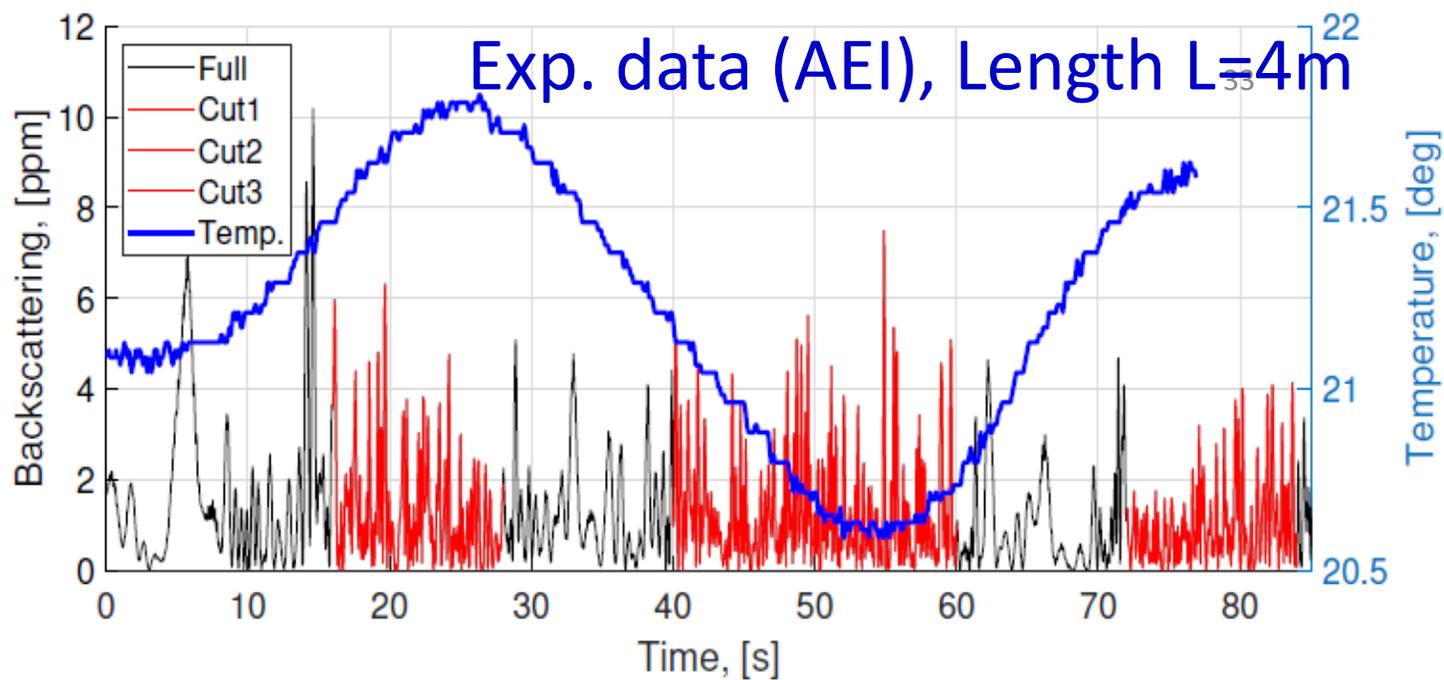
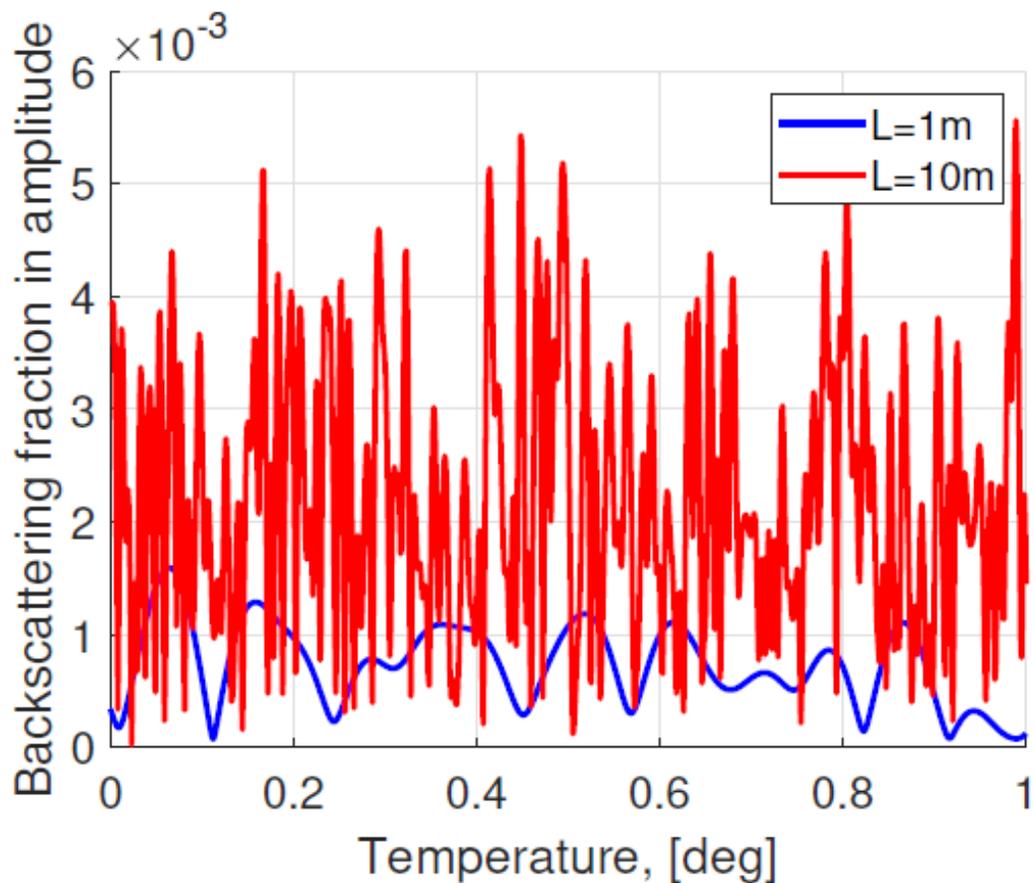
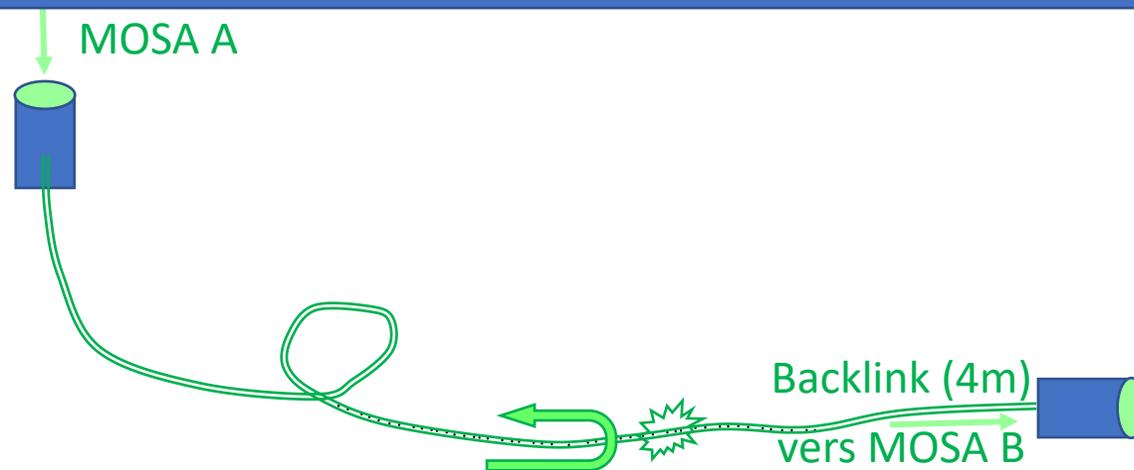
# Speckle, corrélations

Centres diffusant distribués de façon aléatoire

=> speckle vs T

Corrélations entre les deux extrémités

sauf  $\neq v_{opt}$  entre les deux lasers: corrélation  $\downarrow$   
(modèle très sommaire)



# Calculs de lumière parasite dans un interféromètre: méthode approchée

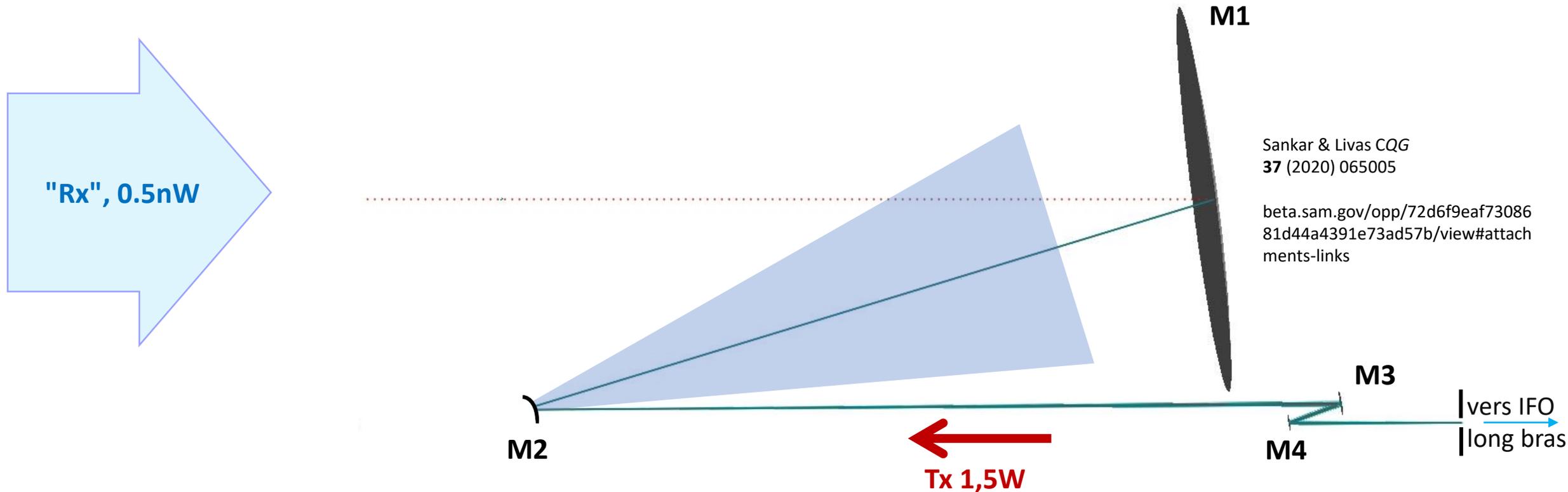
M. Nardello, [whova.com/portal/webapp/isco\\_202103/Agenda/1410017](http://whova.com/portal/webapp/isco_202103/Agenda/1410017)

# Utilité d'une estimation grossière mais analytique

Calculs sous FRED, Zemax de la rétrodiffusion Tx =>  $10^{-13}$  à  $10^{-12}$  pour M2, M3 et M4, **et  $10^{-16}$  pour M1**

Comment expliquer cette différence ?

Comment faire des estimation approchées sans logiciel ?

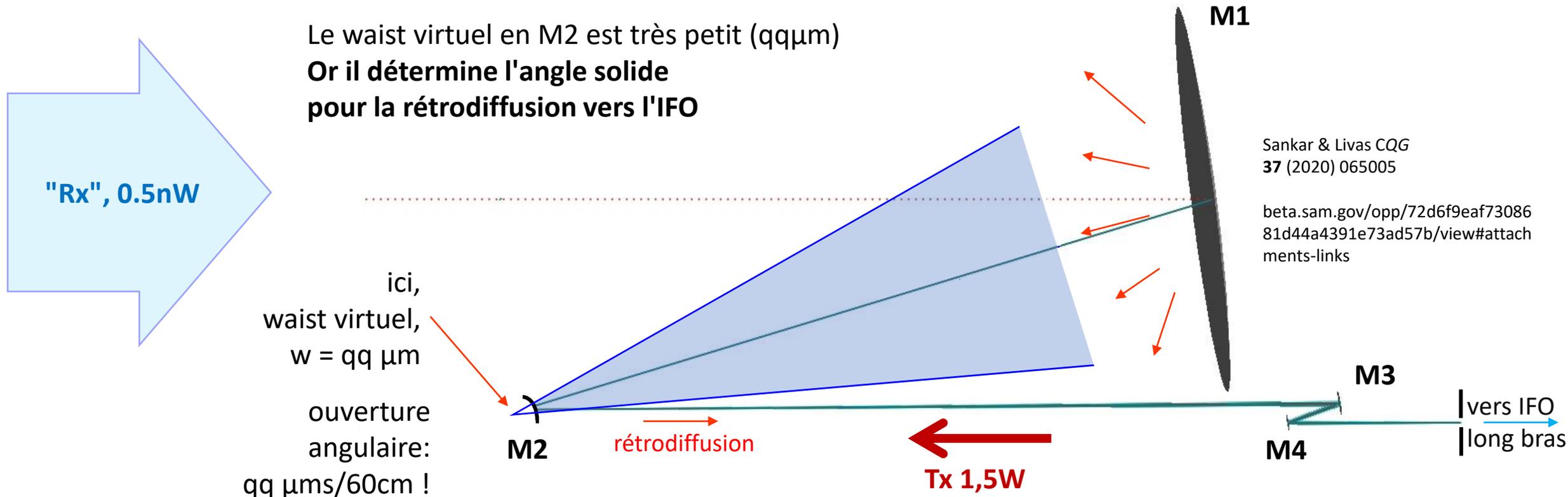


# Utilité d'une estimation grossière mais analytique

Calculs sous FRED, Zemax de la rétrodiffusion  $T_x \Rightarrow 10^{-13}$  à  $10^{-12}$  pour M2, M3 et M4, **et  $10^{-16}$  pour M1**

Comment expliquer cette différence ?

Comment faire des estimation approchées sans logiciel ?



# Estimation grossière mais analytique

En appliquant systématiquement ce calcul simple (la BSDF étant connue par ailleurs) pour les quatre miroirs, on obtient

miroir	simulation FRED	calcul analytique approché
M1	$1.41 \cdot 10^{-16}$	$8.2 \cdot 10^{-17}$
M2	$2.29 \cdot 10^{-13}$	$1.4 \cdot 10^{-13}$
M3	$1.02 \cdot 10^{-12}$	$2.2 \cdot 10^{-12}$
M4	$1.46 \cdot 10^{-13}$	$1.2 \cdot 10^{-13}$

Ce calcul simple rend compte à un facteur  $\approx 2$  près de la valeur attendue.

- => estimation rapide
- => permet de définir des paramètres pour les fonctionnalités d' "importance sampling" (échantillonnage dirigé) qui permettent de restreindre l'espace de rayons à prendre en compte dans les logiciels: gain de temps

# Quelques perspectives

## Travail à venir sur

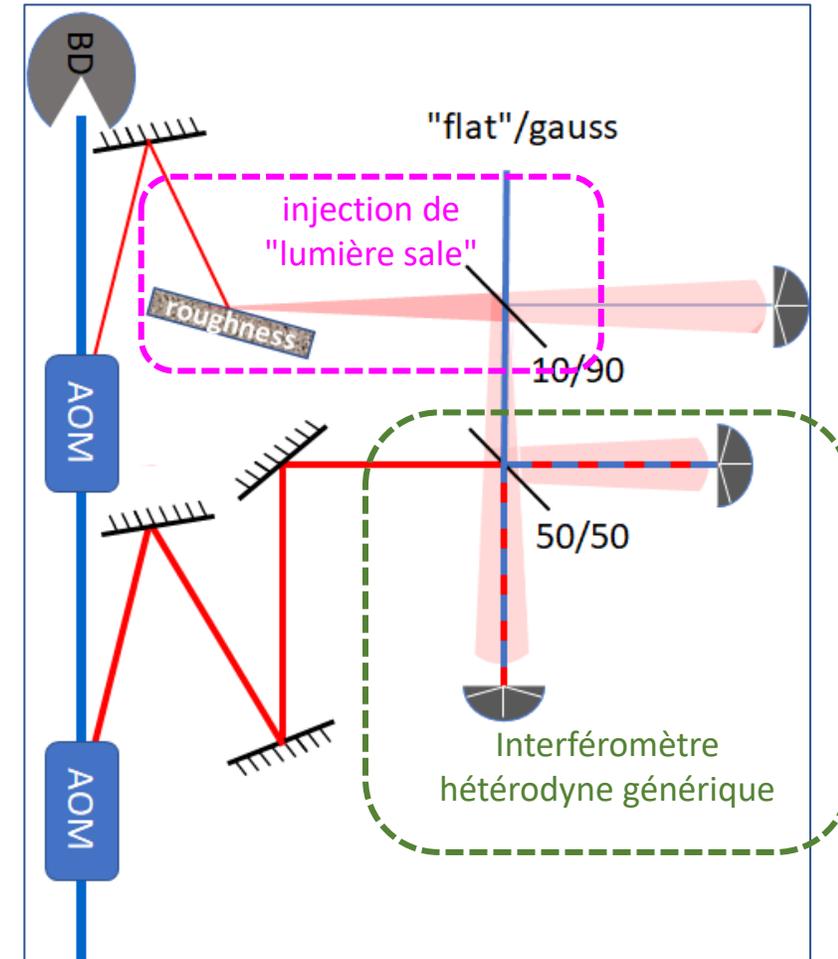
- la fibre de back-link: peut-on garantir une meilleure soustraction de la contribution SL ? (jusqu'ici 90%)
- le "halo" de lumière diffusée  $\Delta\lambda$  (bruit de phase important)
- réflexion sur les lames de polarisation mobiles (stabilité spécifiée à 3.8nm)
- la lumière parasite dans l'interféromètre de test mass (fenêtre du GRS)
- tests de l'injection de lumière parasite dans un interféromètre
- instrumentation "SL-OGSE" chargée des tests de lumière parasite à l'issue de l'intégration MOSA

# Injection de lumière parasite diffusée

Injection de lumière diffusée dans un interféromètre hétérodyne:

Simule la perturbation d'un interféromètre de type LISA:

- signal hétérodyne
- photodiodes à quadrant
- => test de la perturbation du Differ. Wavefront Sensing (DWS)
- => tests de la soustraction en mode équilibré



# SL-OGSE: mesure de la lumière parasite au niveau MOSA

