

Les activités du "stray light work group" de LISA

Michel Lintz, ARTEMIS / OCA

michel.lintz@oca.eu

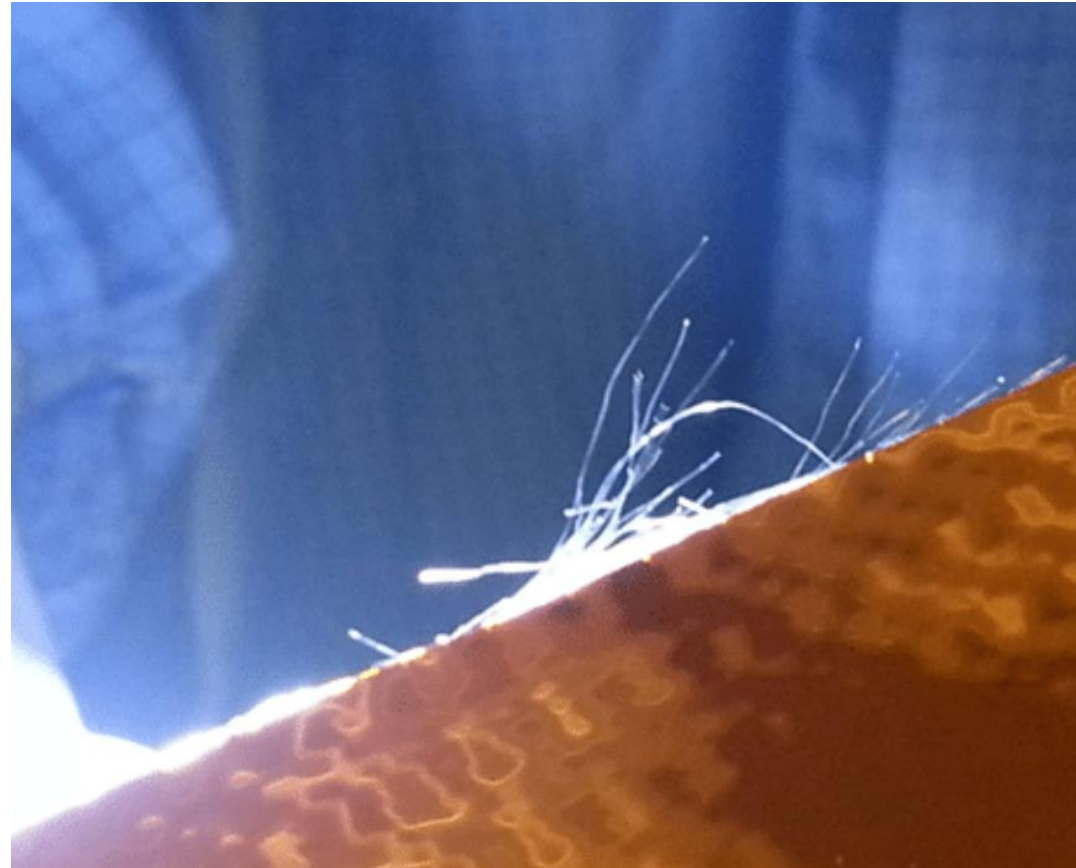
Lumière parasite

"**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



$$\cos^2(\theta + \delta\theta) = \overset{10^{-8}}{\cos^2\theta} + \overset{10^{-5}, 10^{-6}, \text{ voire } 10^{-7}}{2\delta\theta \cos\theta} + \overset{10^{-4}}{2\alpha \cos\varphi \cos\theta}$$

En puissance:
 $\alpha^2 \ll (\delta\theta)^2 !$

☹ Peut perturber les diodes de pompage des horloges atomiques

La propagation de faisceaux mesure les variations de la métrique

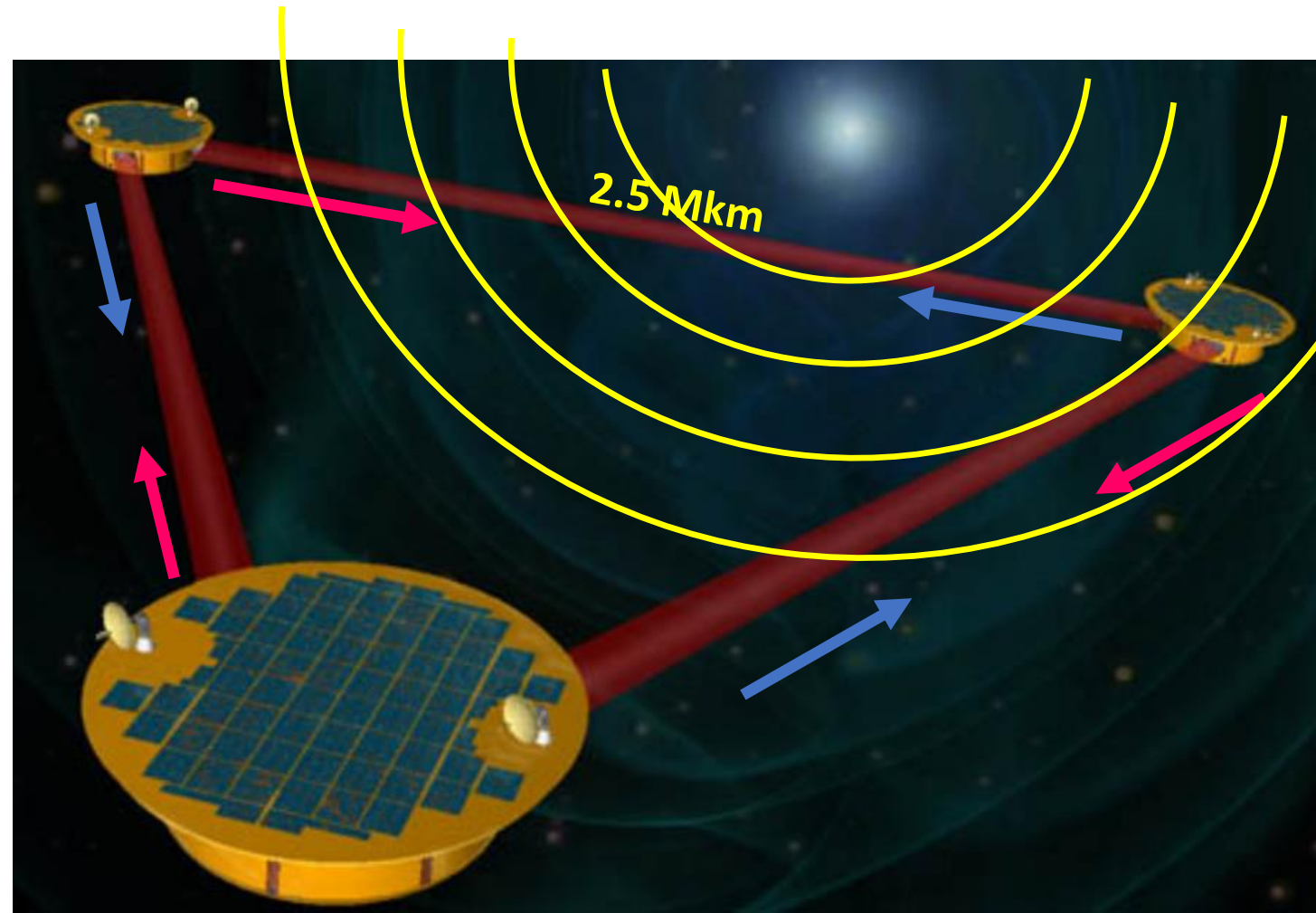
=> 6 mesures séparées

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

- fréquences $20\mu\text{Hz}$ - 1Hz

- complémentaires des détecteurs terrestres

- détection hétérodyne



La propagation de faisceaux mesure les variations de la métrique

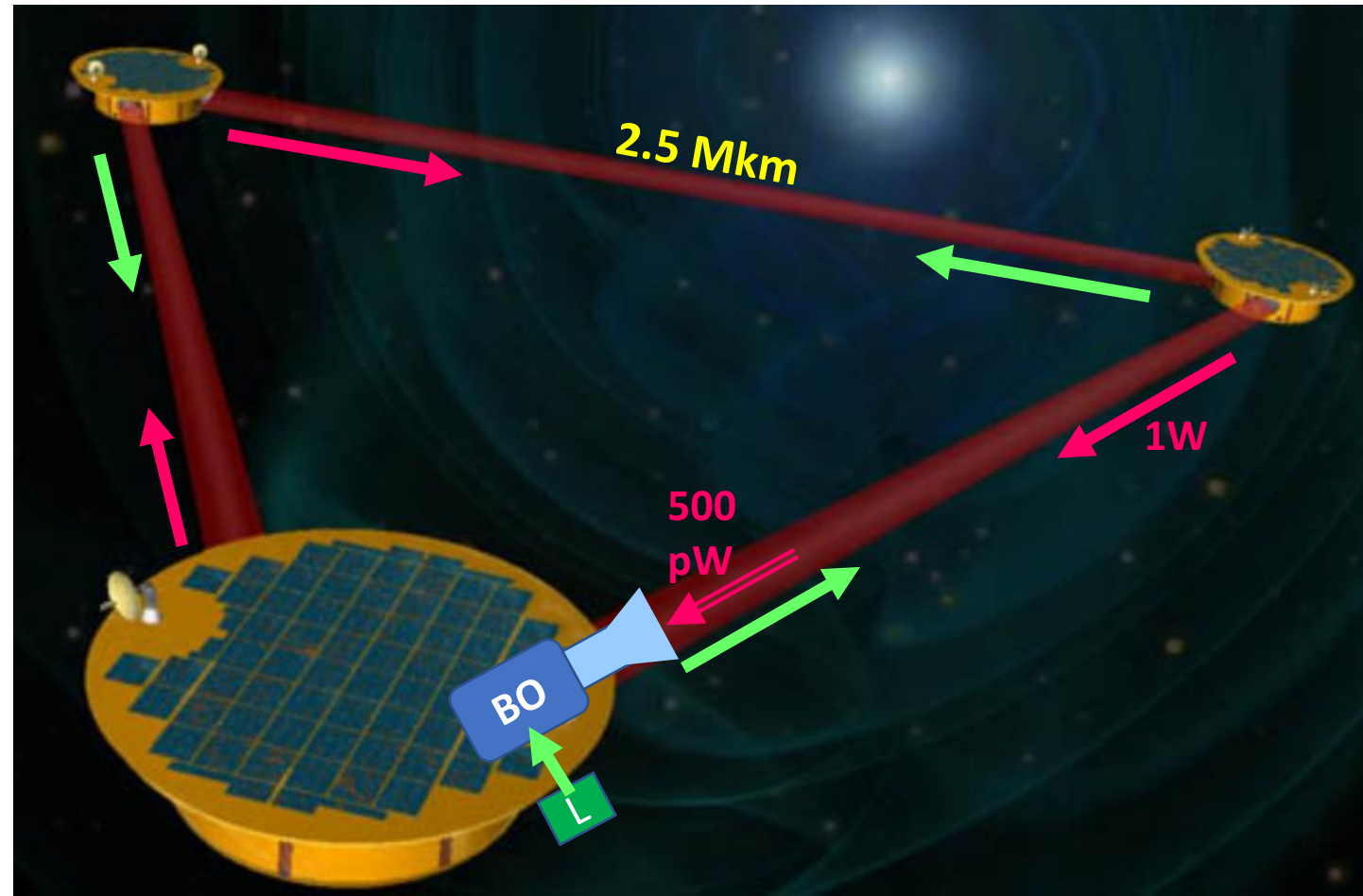
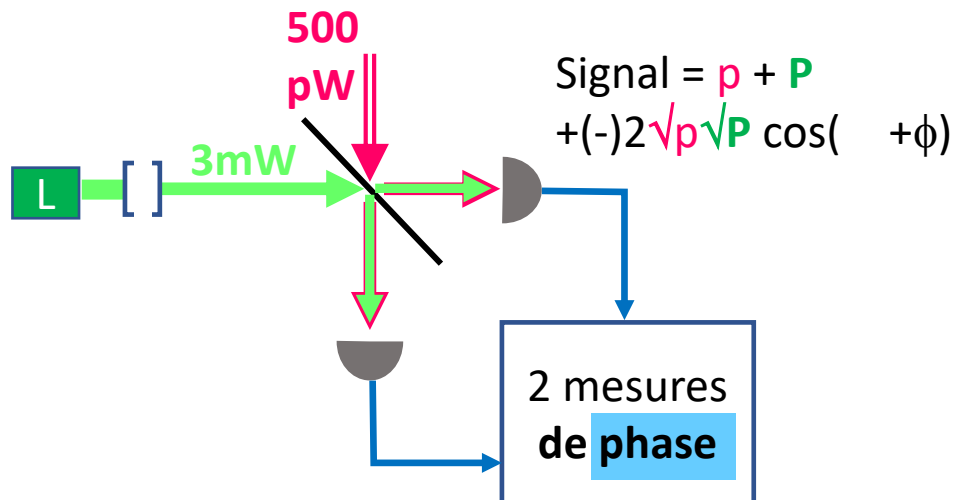
=> 6 mesures séparées

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

- fréquences 20 μ Hz-1Hz

- complémentaires des détecteurs terrestres

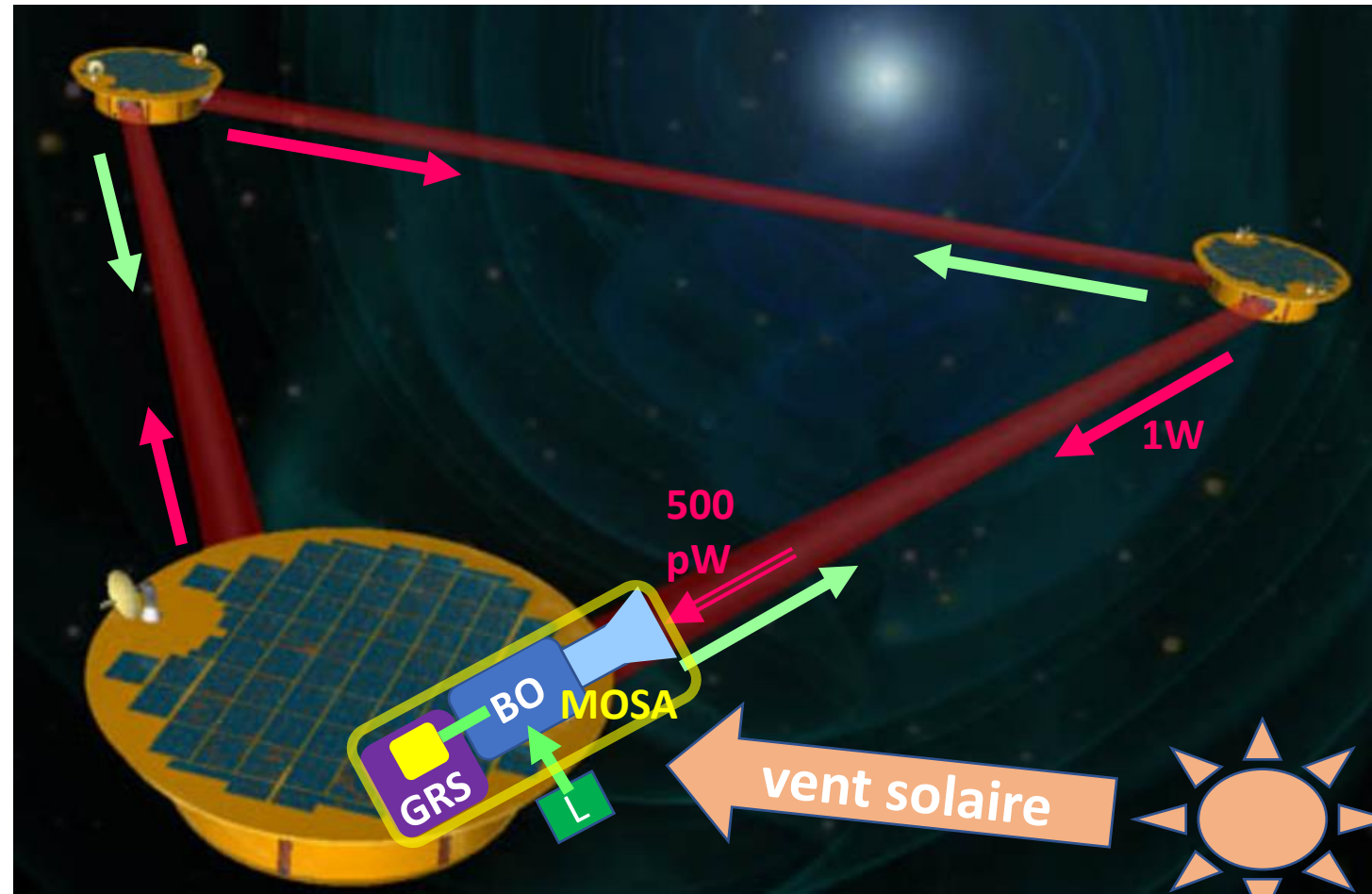
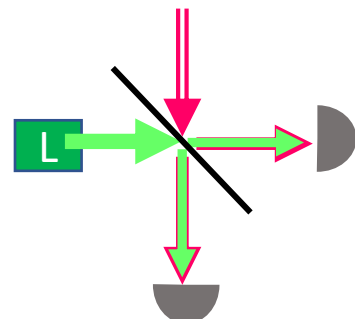
- détection hétérodyne



La propagation de faisceaux mesure les variations de la métrique

- => 6 mesures séparées
- => tenir compte des retards (8s) de propagation
- fréquences $20\mu\text{Hz}$ - 1Hz
- complémentaires des détecteurs terrestres
- détection hétérodyne

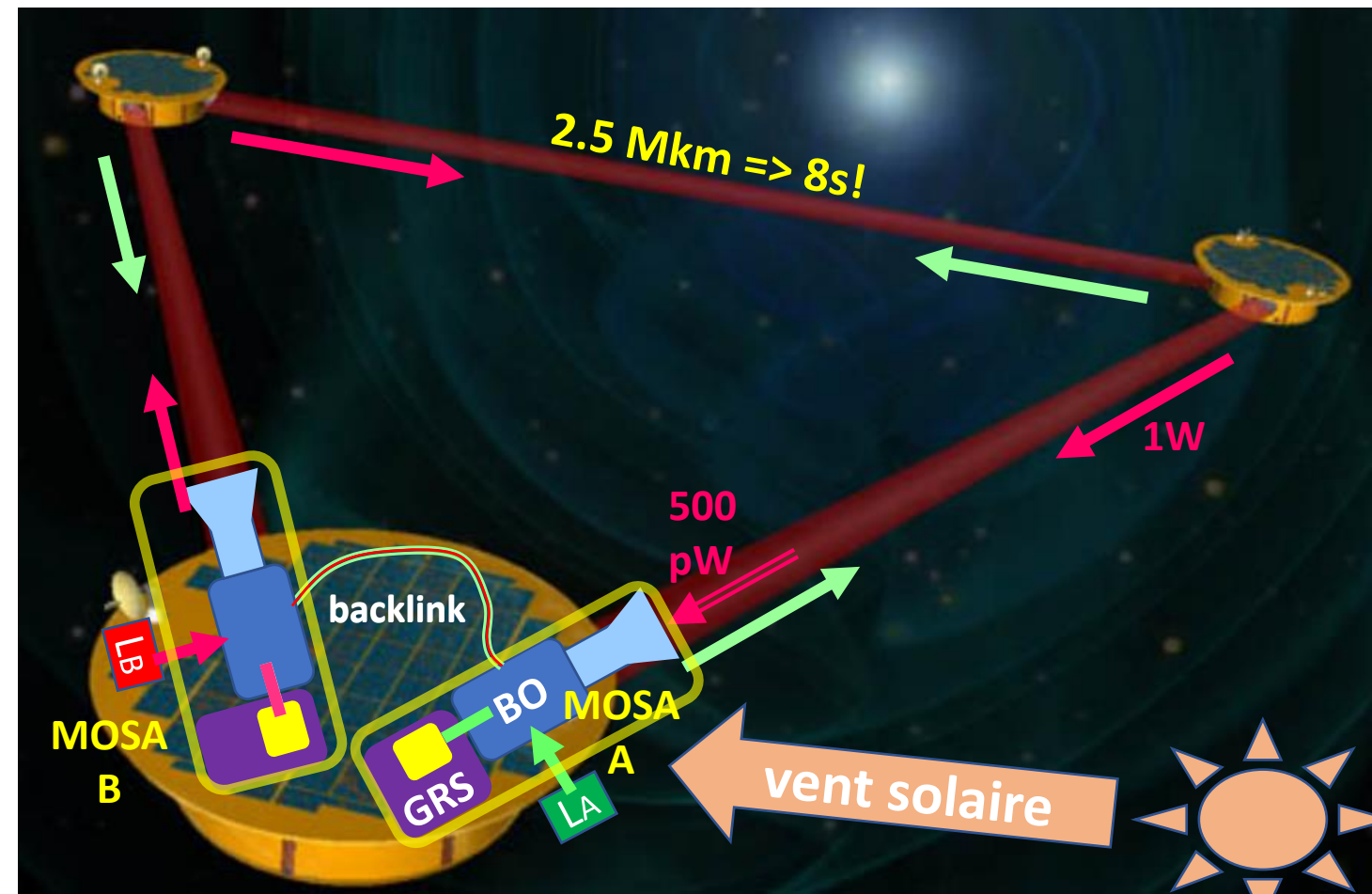
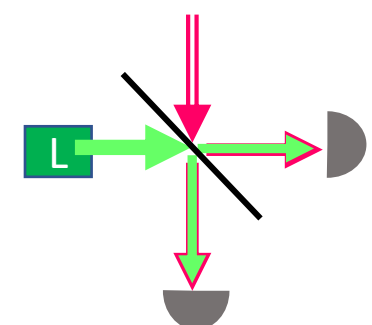
- 2x MOSA (moving optical subassembly)
- par satellite
- chaque MOSA intègre 3 interféros:
- "science", "Test Mass", et "reference"



Principes de la mission LISA

- 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!**

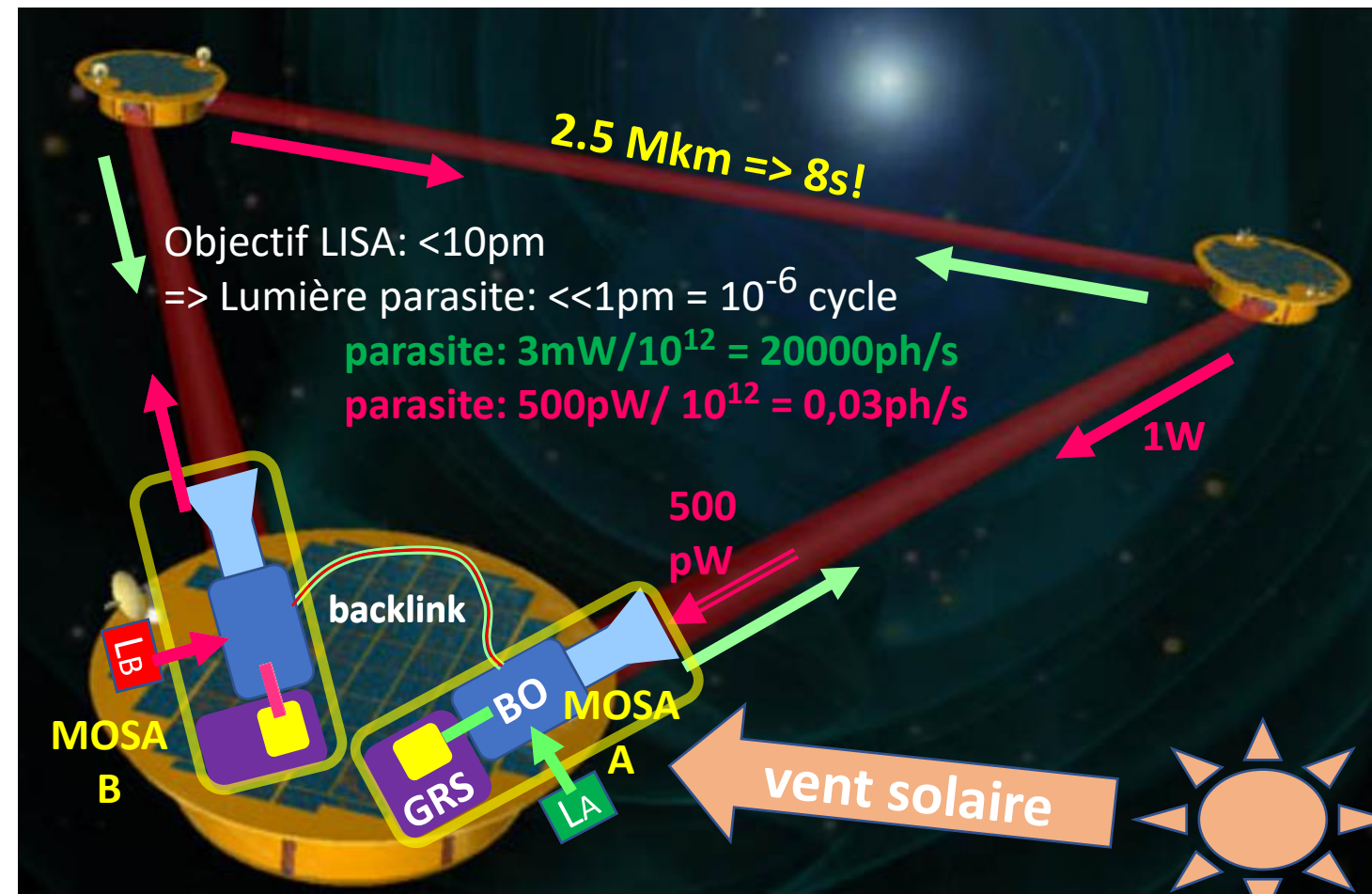
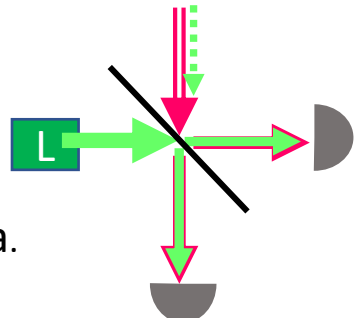
- 2x MOSA (moving optical subassembly) par satellite
- chaque MOSA intègre 3 interféros: "science", "Test Mass", et "reference"
- 6 liens laser + TDI (time-delayed Interf.) réjection du bruit de fréquence des lasers

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

nom. phasor

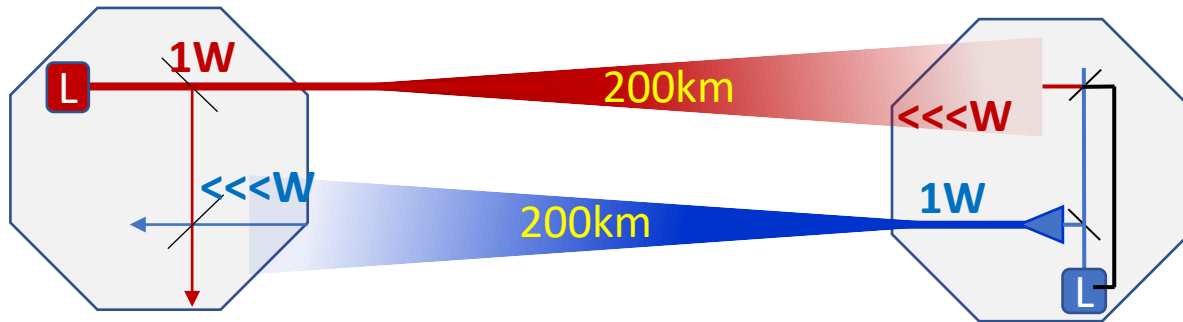
pert.!

para.



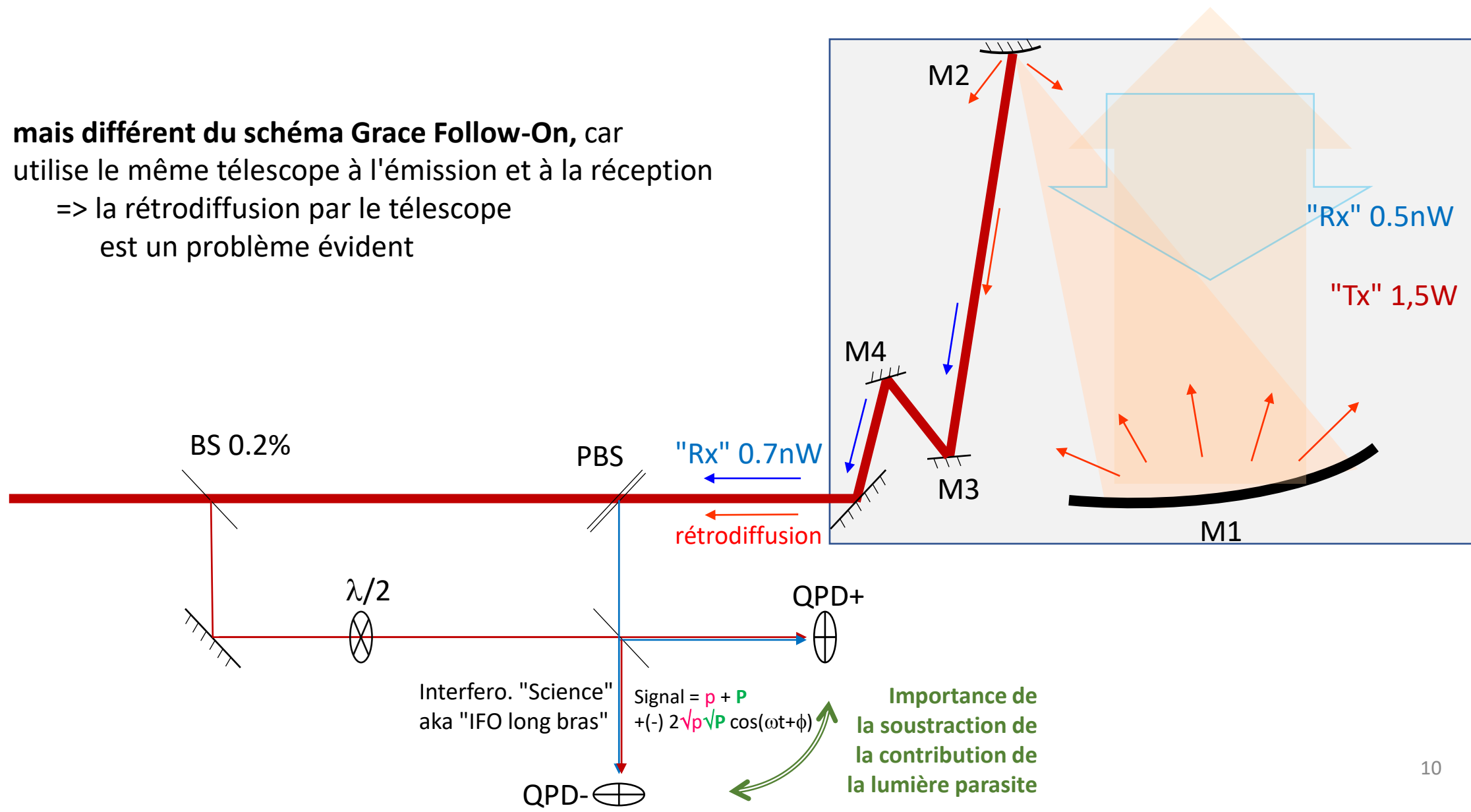
Le schéma "transpondeur" de LISA

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** (*fibre 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)
 - 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) 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)

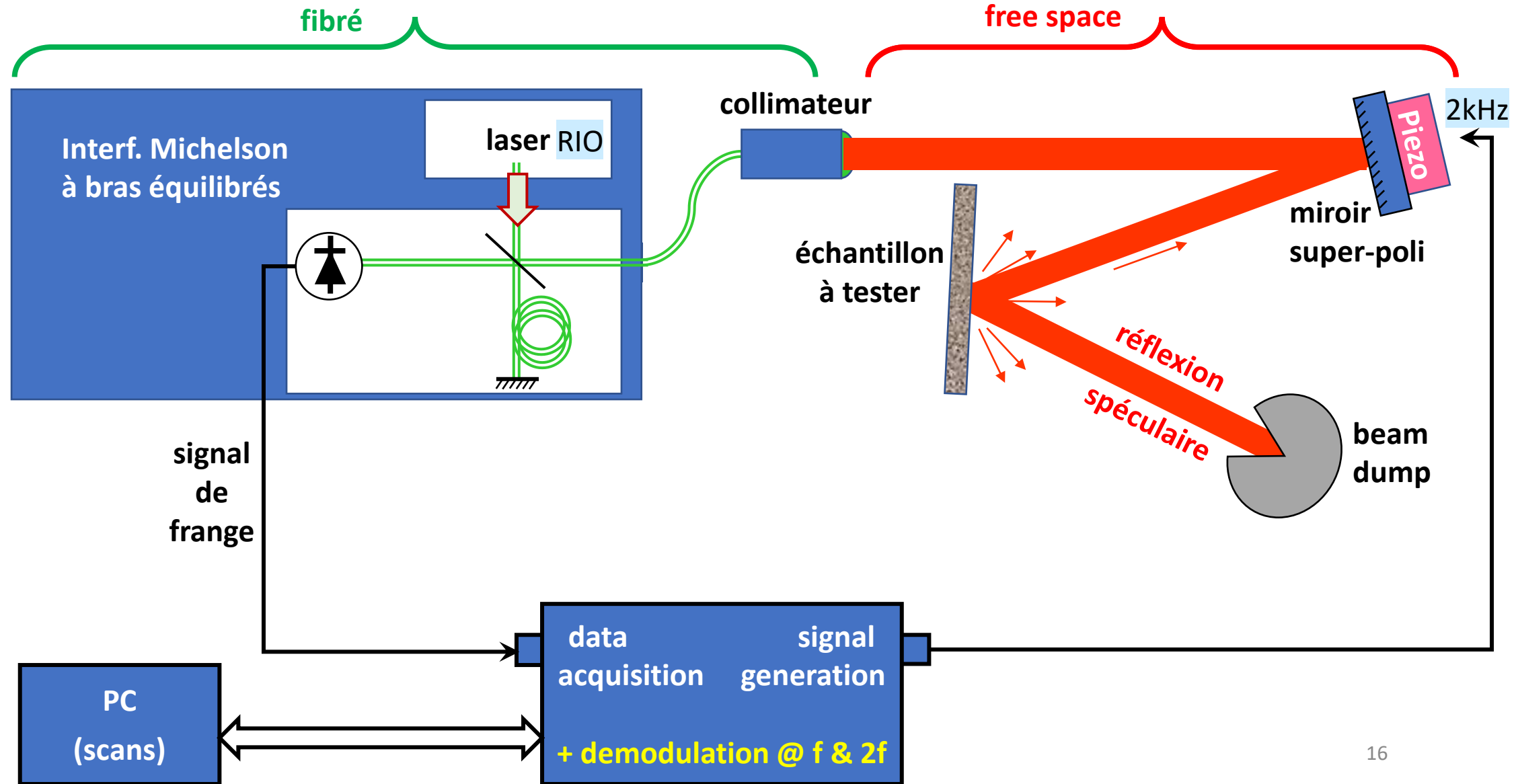
Calculs de lumière parasite dans un interféromètre: méthode approchée (ARTEMIS)

Perspectives

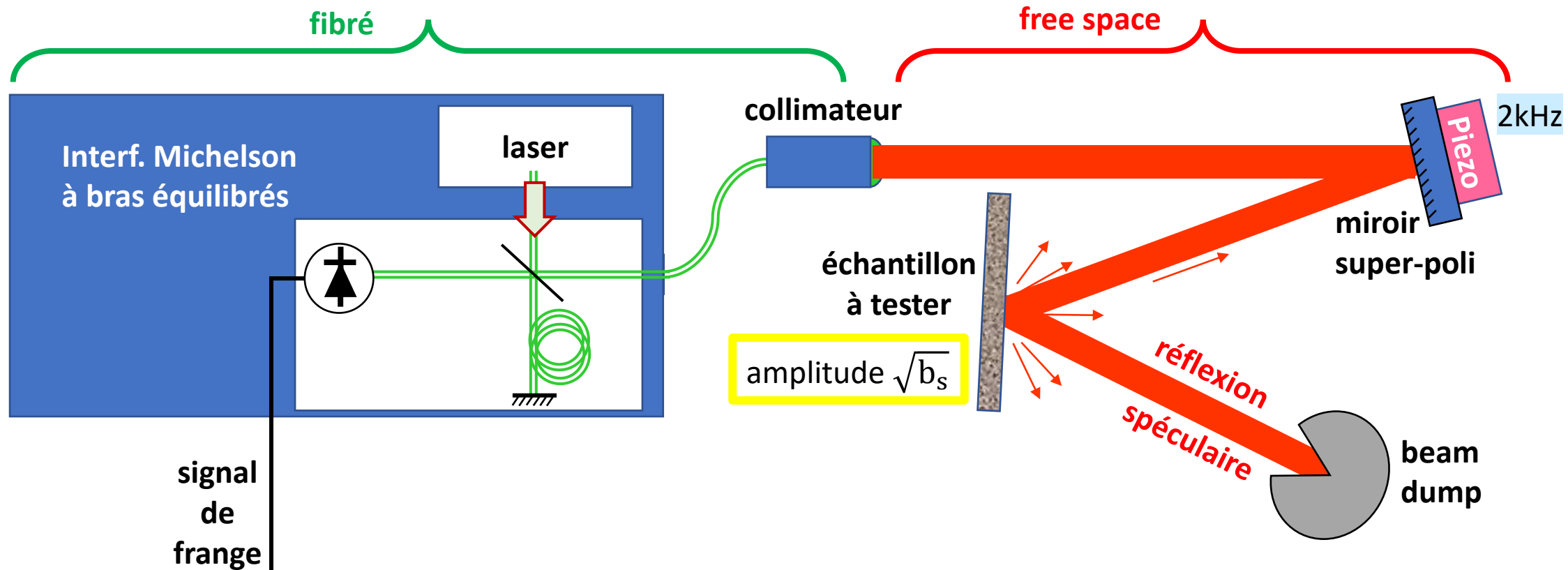
Etude de la rétrodiffusion par une surface par Interférométrie Michelson

thèse Khodnevykh, tel.archives-ouvertes.fr/tel-03177562v1

Interférométrie Michelson: schéma de démodulation



Interférométrie Michelson: schéma de démodulation

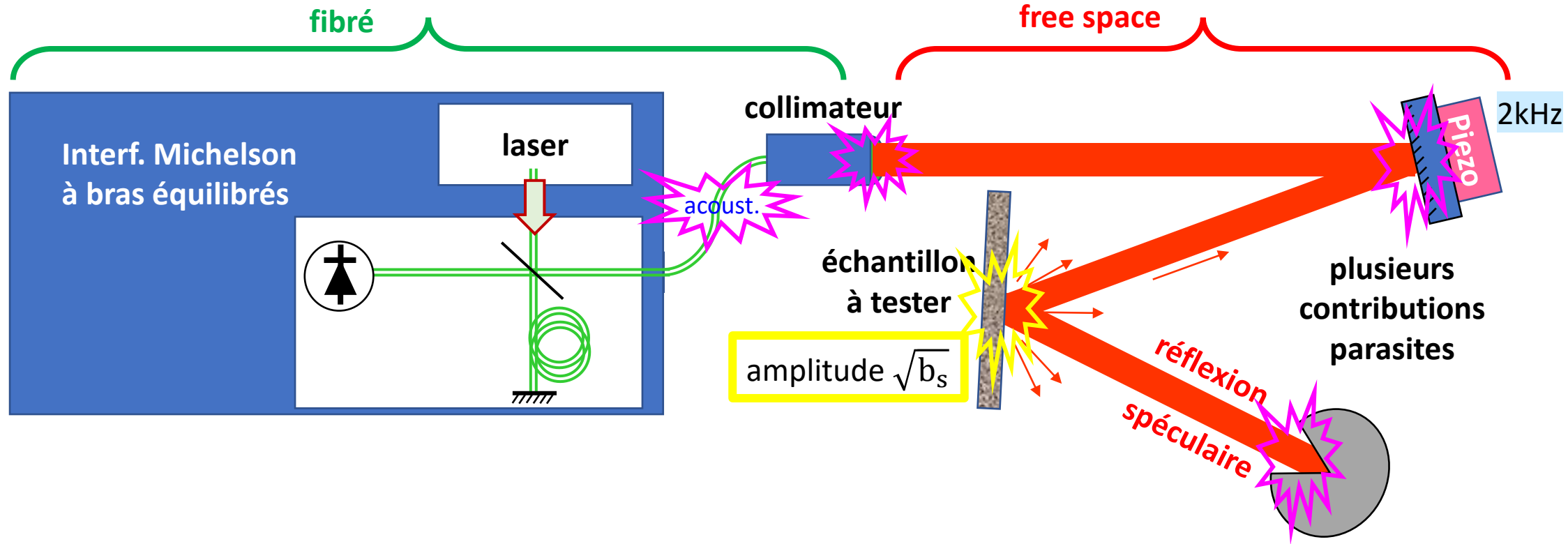


$$\frac{I_{\text{Laser}}}{2} \sqrt{b_s} \cos(\Delta\phi_s)$$

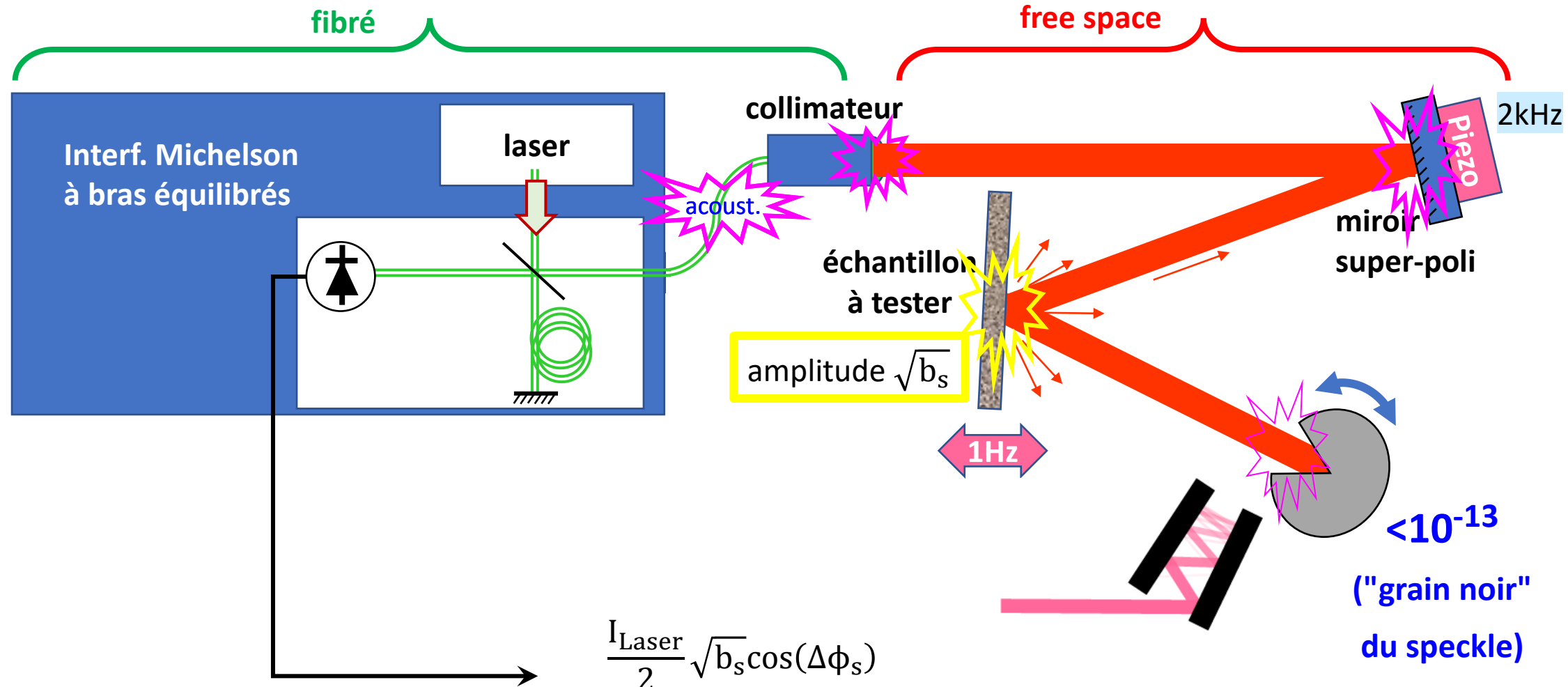
$$\sqrt{b_s} = \sqrt{\left(\frac{R_1}{2J_1(2\pi\delta_{PM})}\right)^2 + \left(\frac{R_2}{2J_2(2\pi\delta_{PM})}\right)^2} \frac{1}{I_L/2}$$

R_1 (R_2)
démodulation
à f (à $2f$)

Contribution nominale, contributions parasites

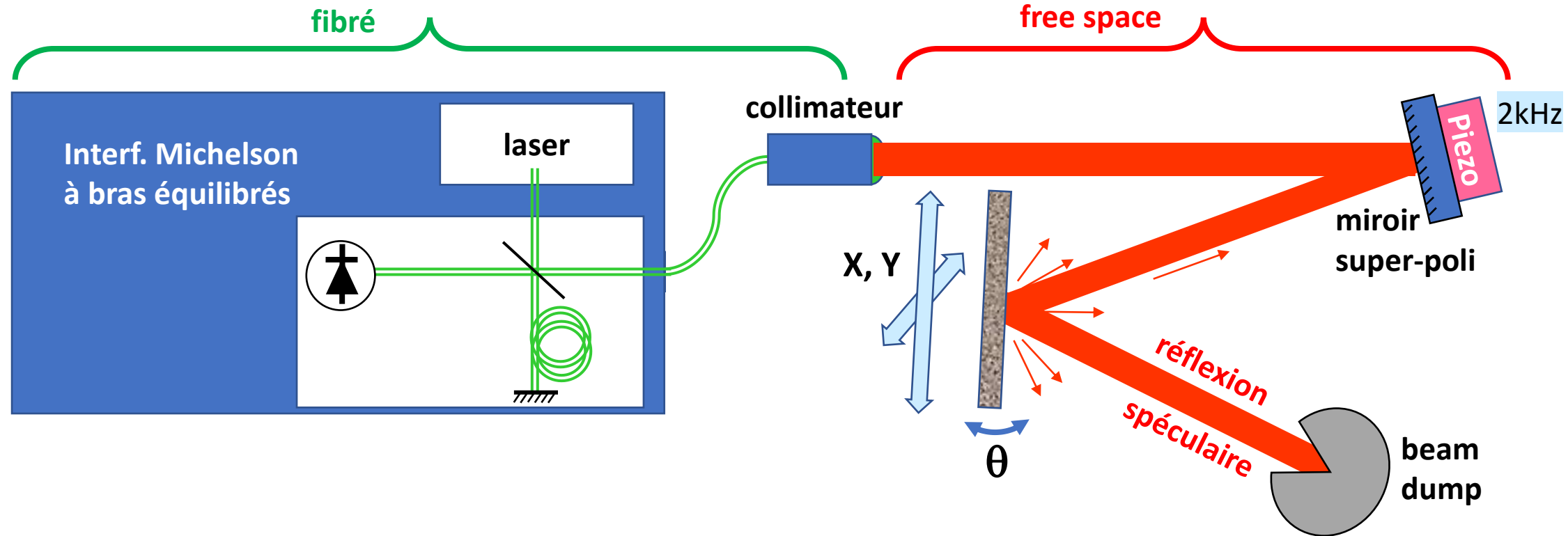


Contribution nominale, contributions parasites

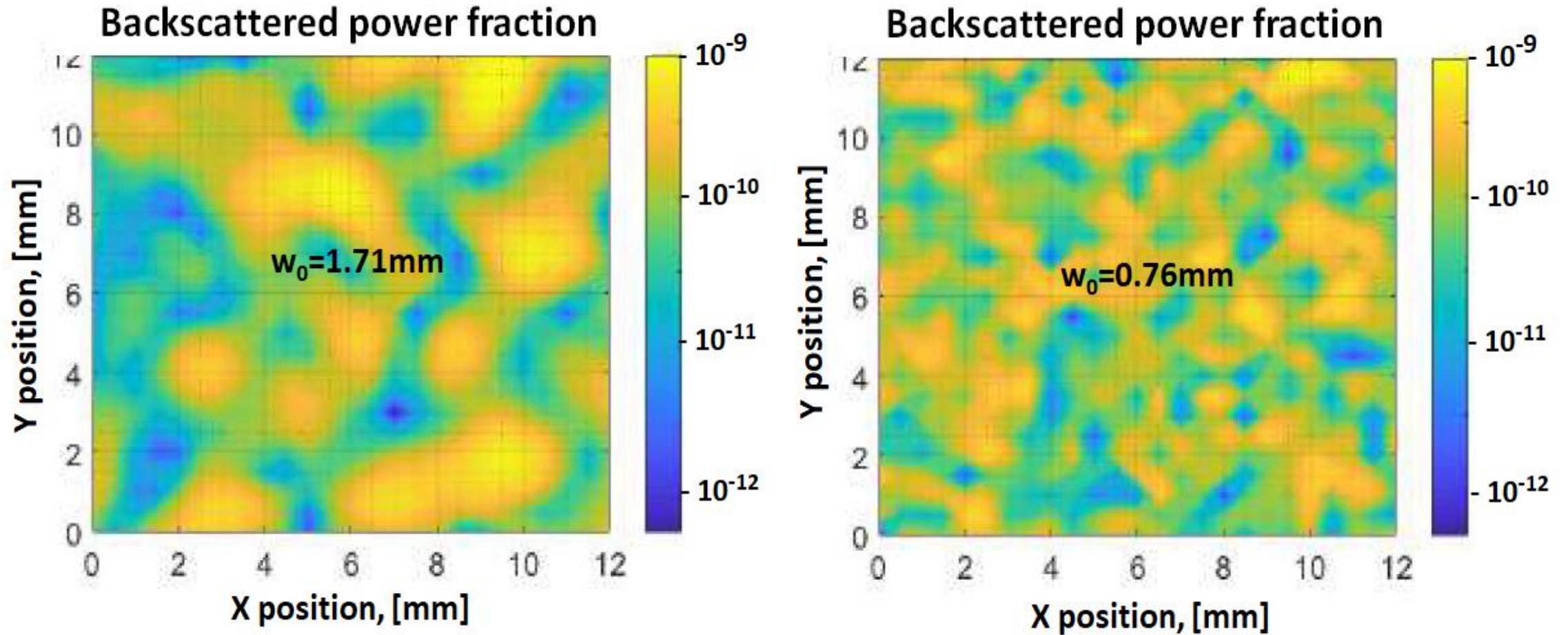


$$\sqrt{b_s} = \sqrt{\left(\frac{R_1}{2J_1(2\pi\delta_{PM})}\right)^2 + \left(\frac{R_2}{2J_2(2\pi\delta_{PM})}\right)^2} \frac{1}{I_L/2}$$

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



Propriétés de speckle: scans X-Y

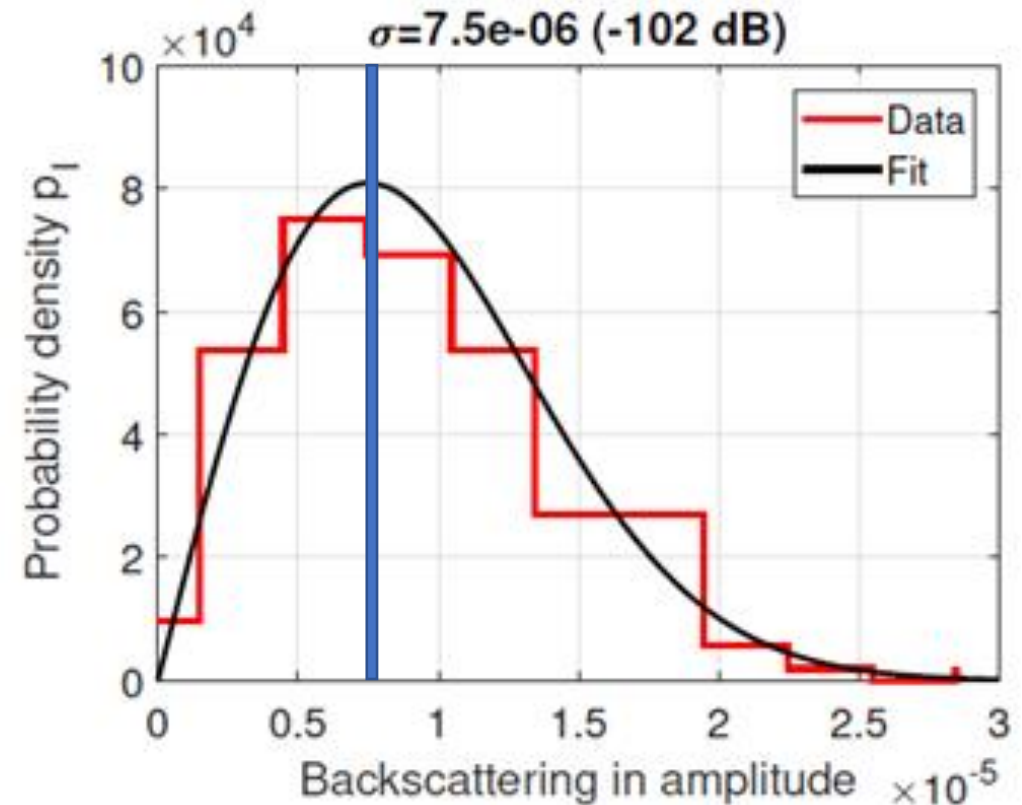
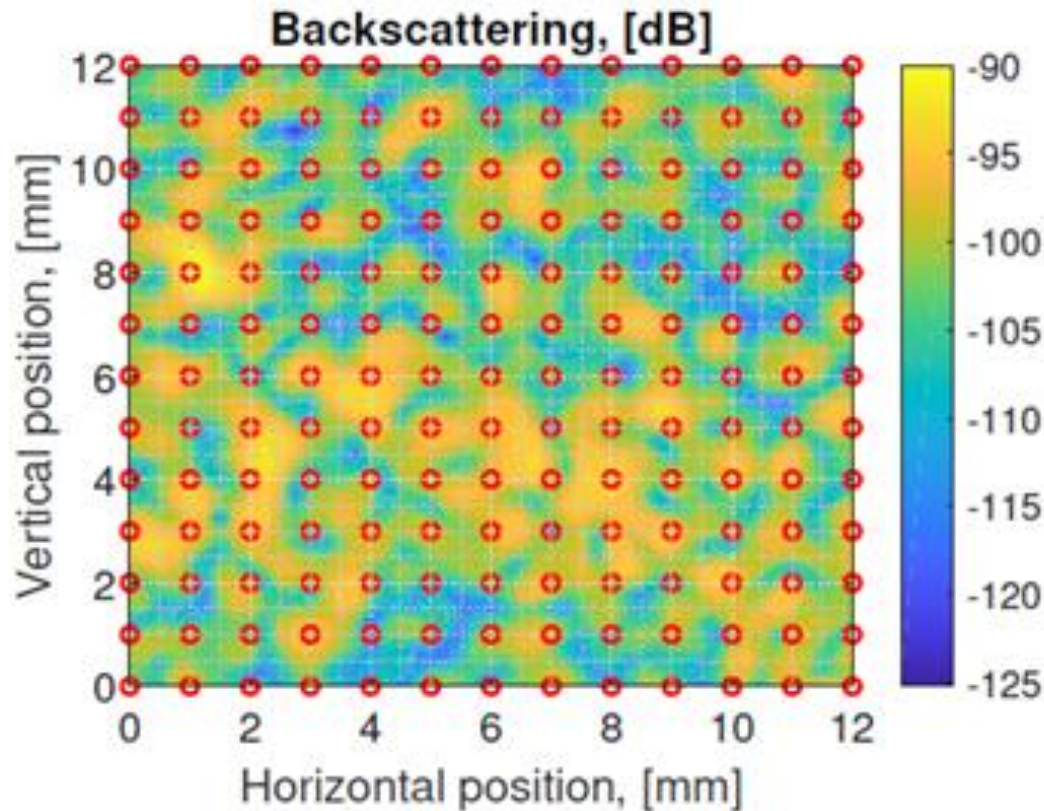


Taille d'un "grain" de speckle \sim waist du faisceau (intégration sur la dimension du faisceau)

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

incidence 14° , fixe

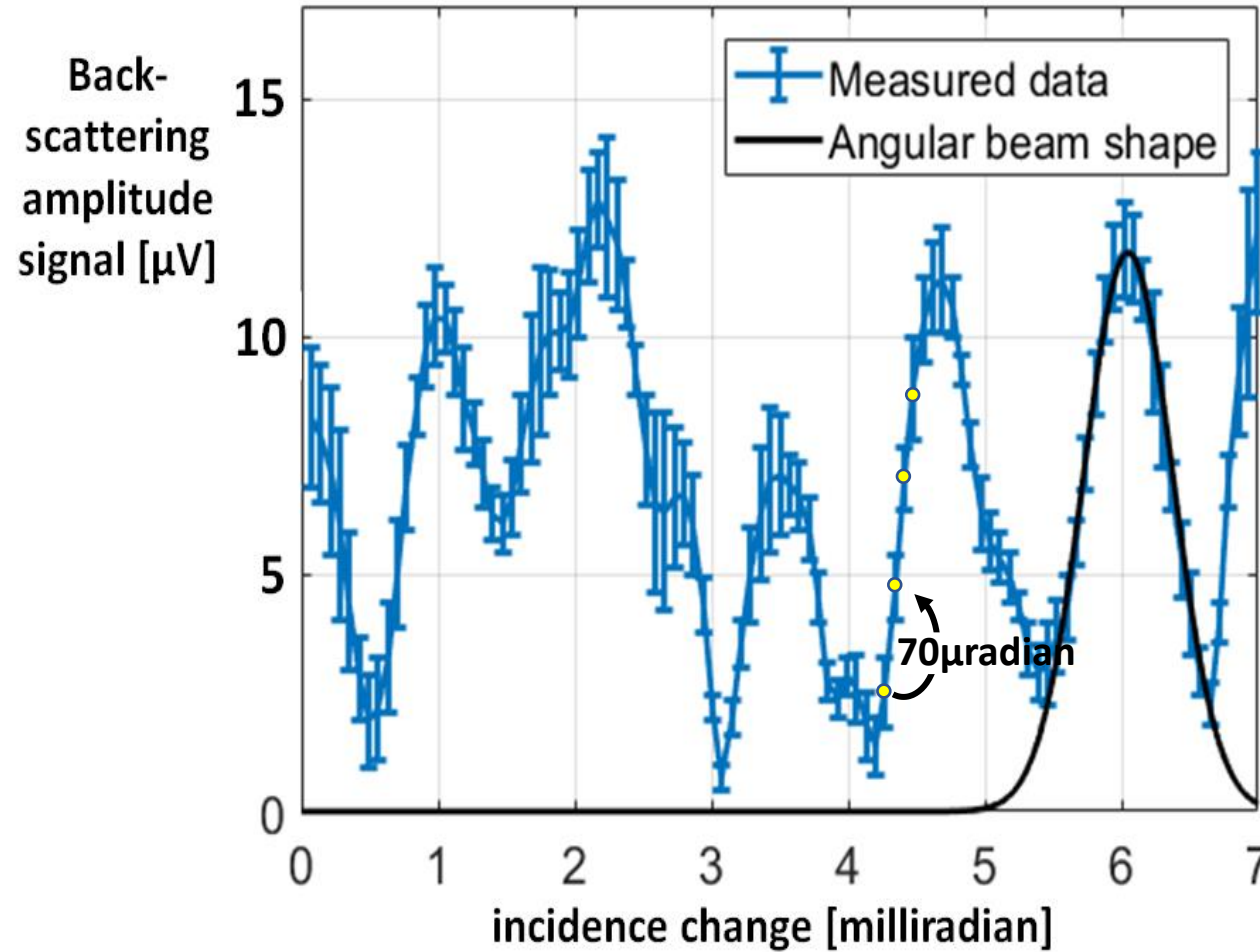
Propriétés de speckle: distribution dans les scans X-Y



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?

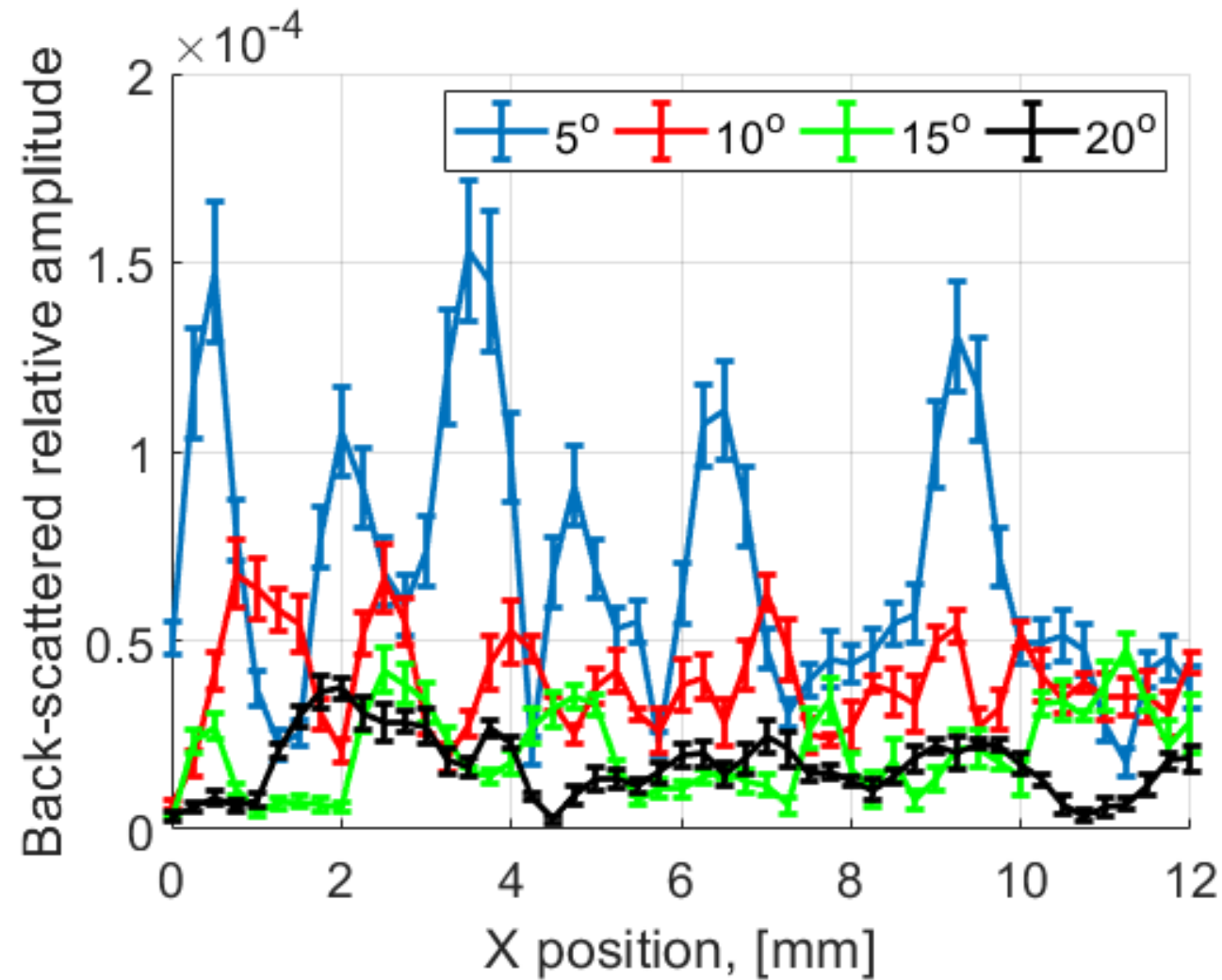
Propriétés de speckle: scans angulaires (*petite échelle*)



Dépendance très rapide à l'angle d'incidence:

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

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



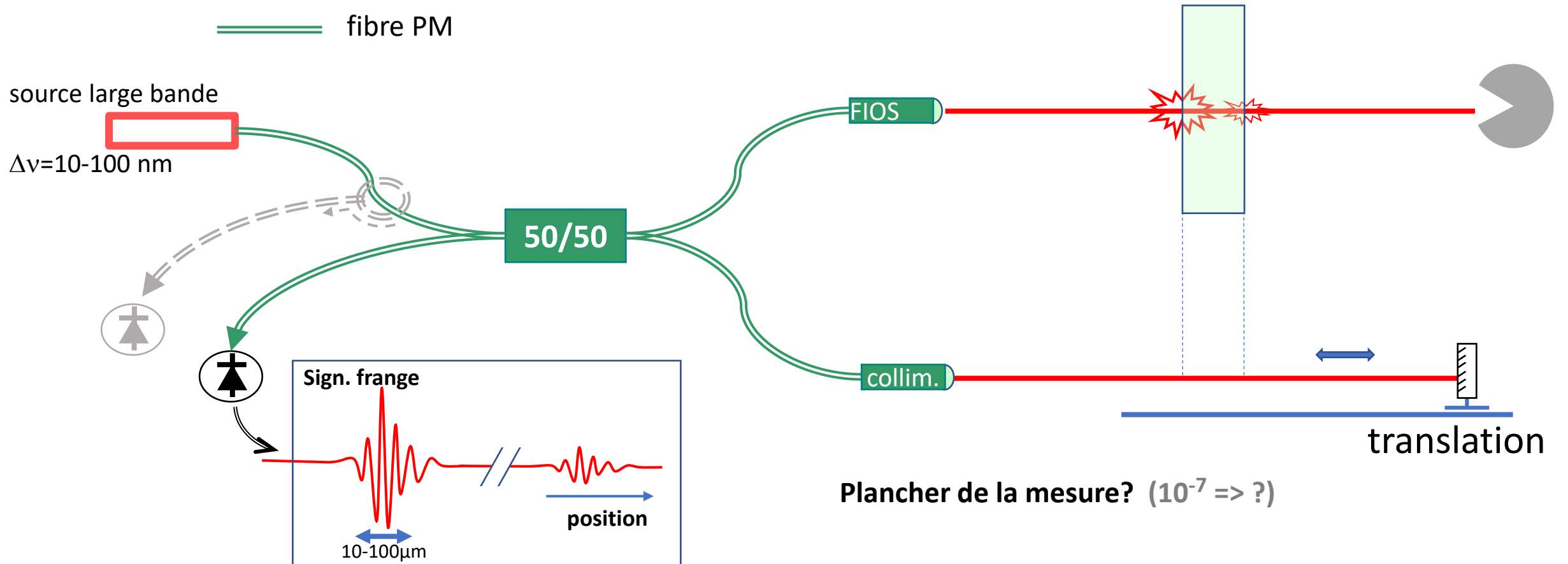
dépendance vs incidence
attendue pour
un poli optique

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

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



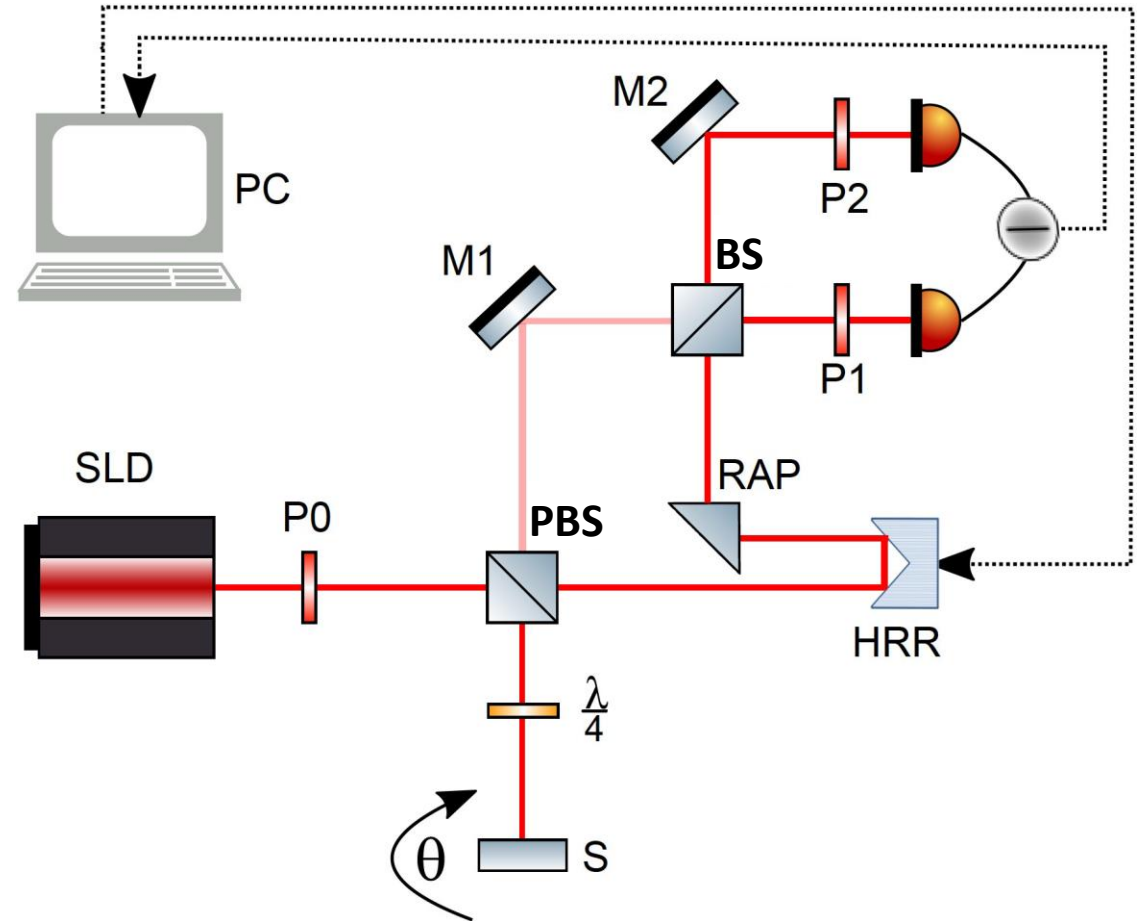
OLCR: Optical Low Coherence Reflectometry

Configuration Mach-Zehnder

Mesure différentielle: Nirvana Thorlabs

Ajustement de la puissance par polariseur P0

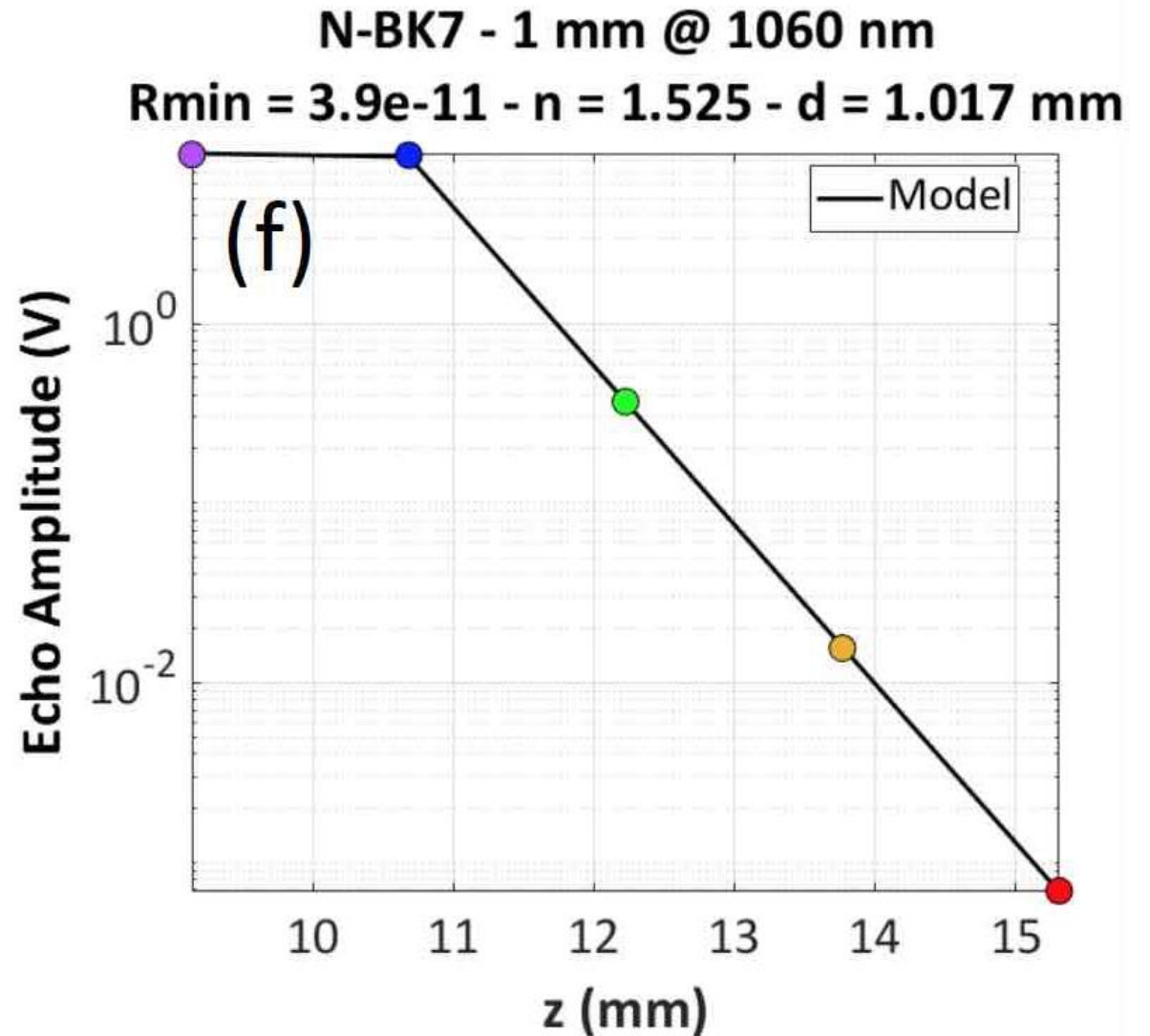
Filtrage spectral autour de la fréquence signal



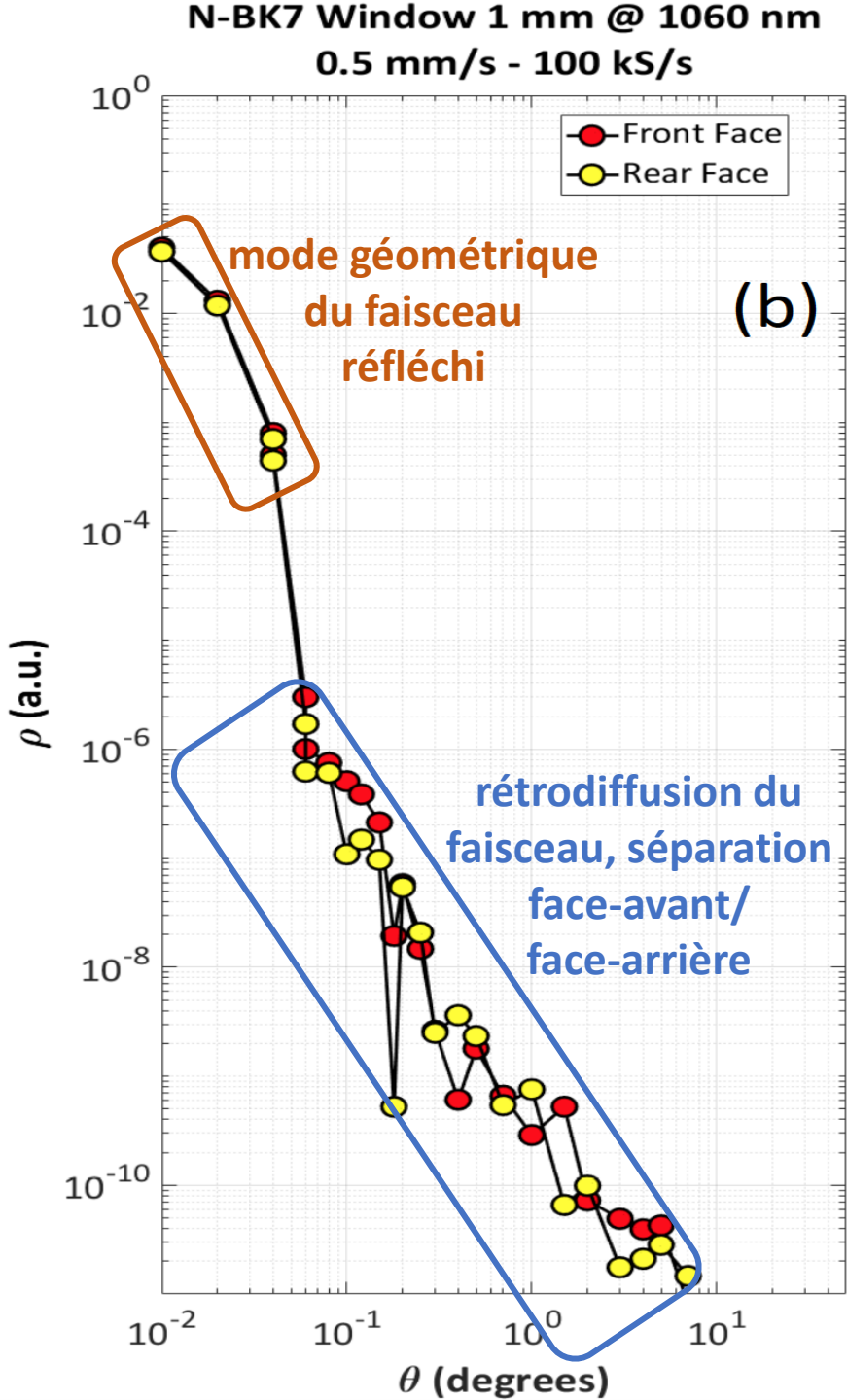
OLCR: Optical Low Coherence Reflectometry

Test du montage: lame BK7 à incidence normale

Après le premier écho, échos successifs attendus

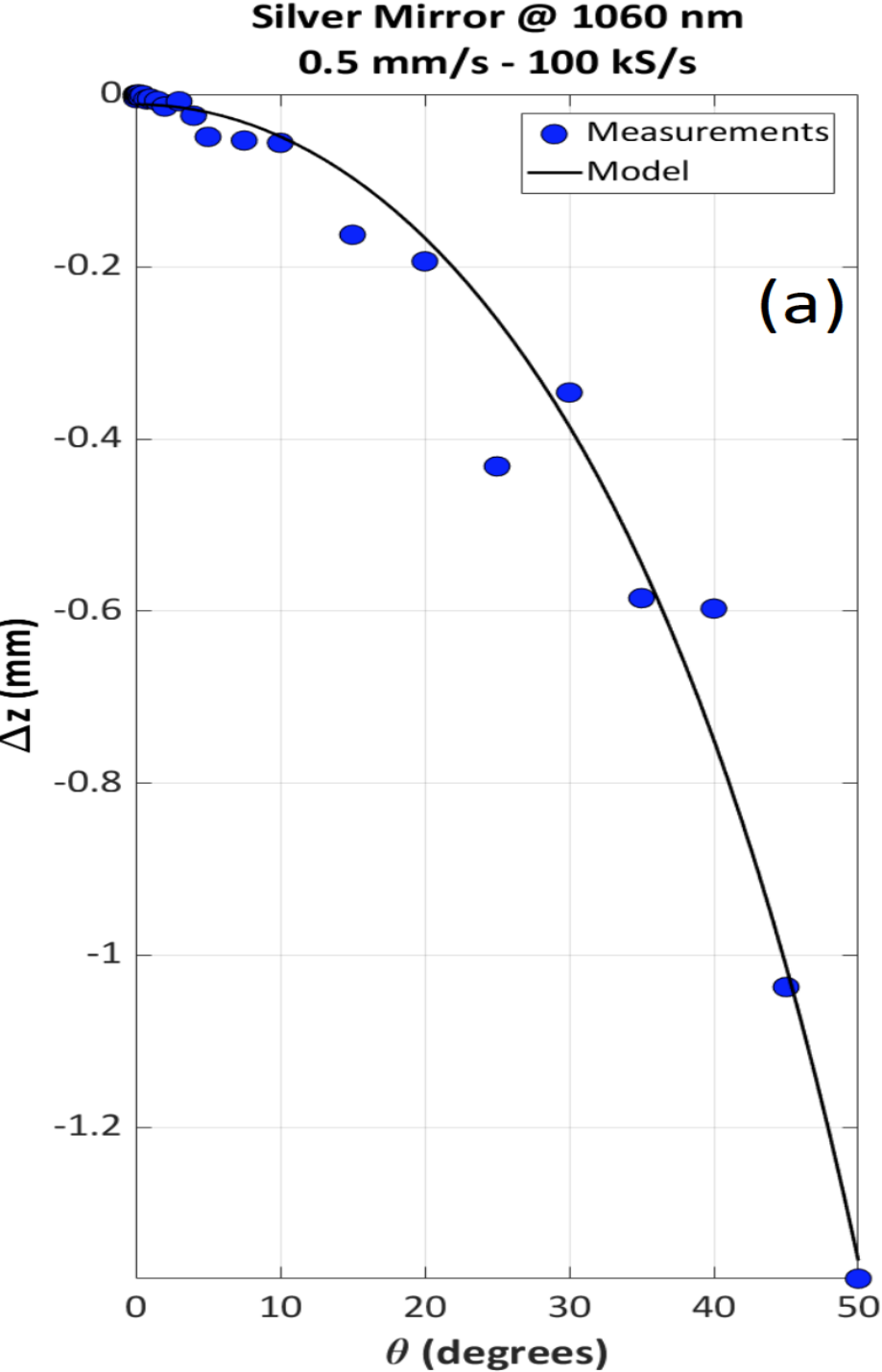


Low Coherence Reflectometry



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

Low Coherence Reflectometry

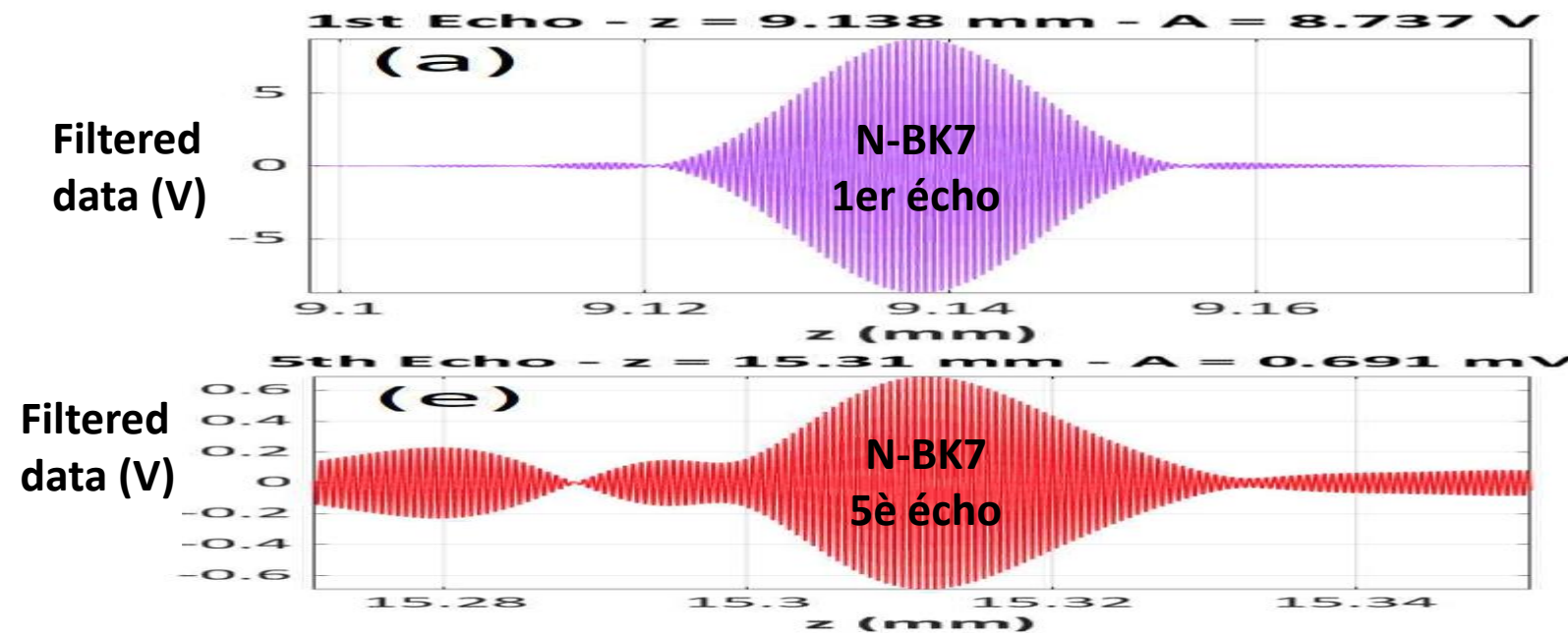


Restitution de la position de l'écho (speckle?)

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

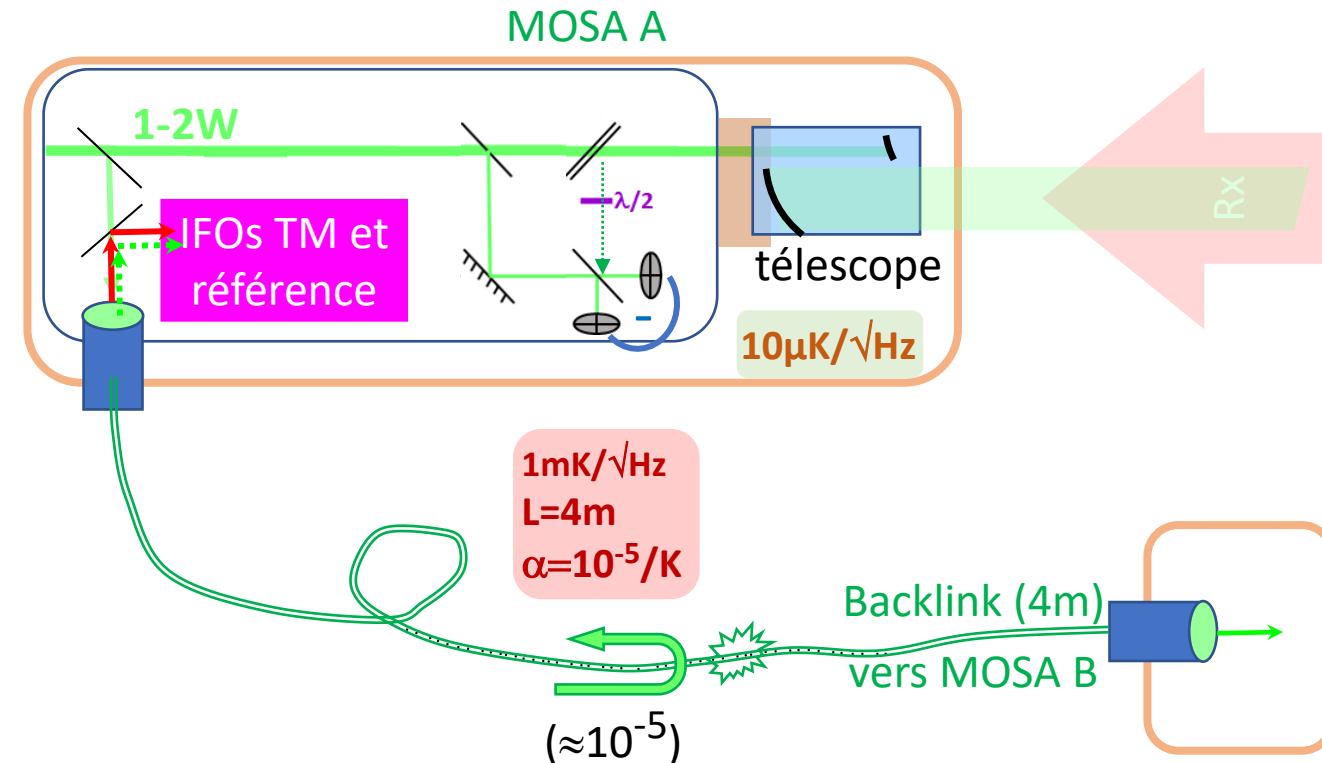
K. Isleif et al, CQG 35 (2018) 085009

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.)

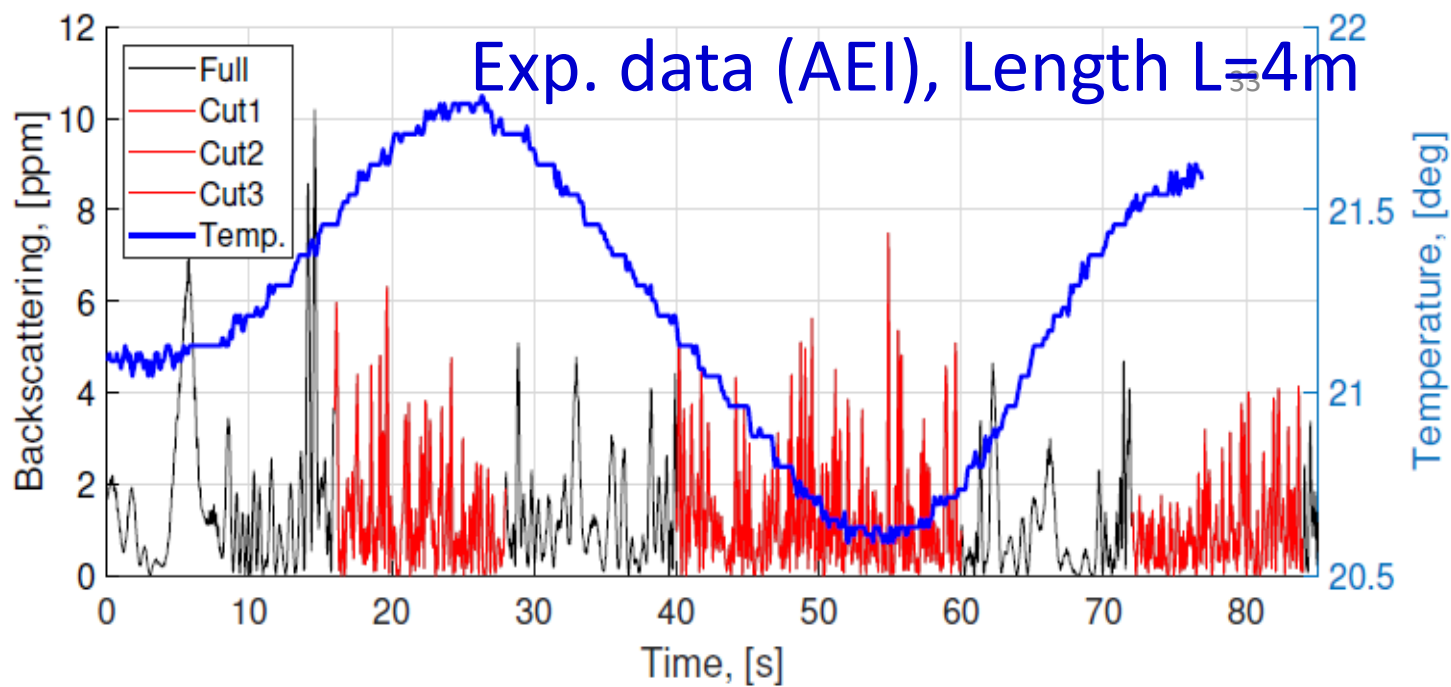
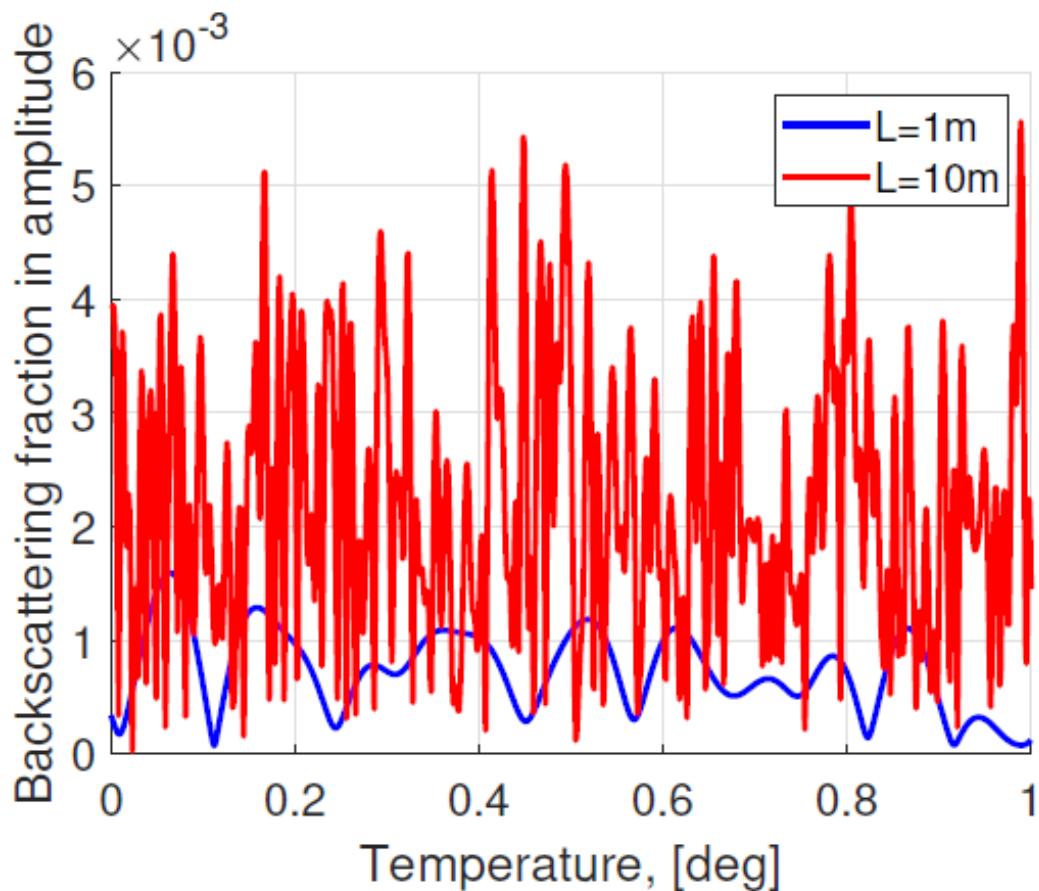
Speckle, corrélations

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

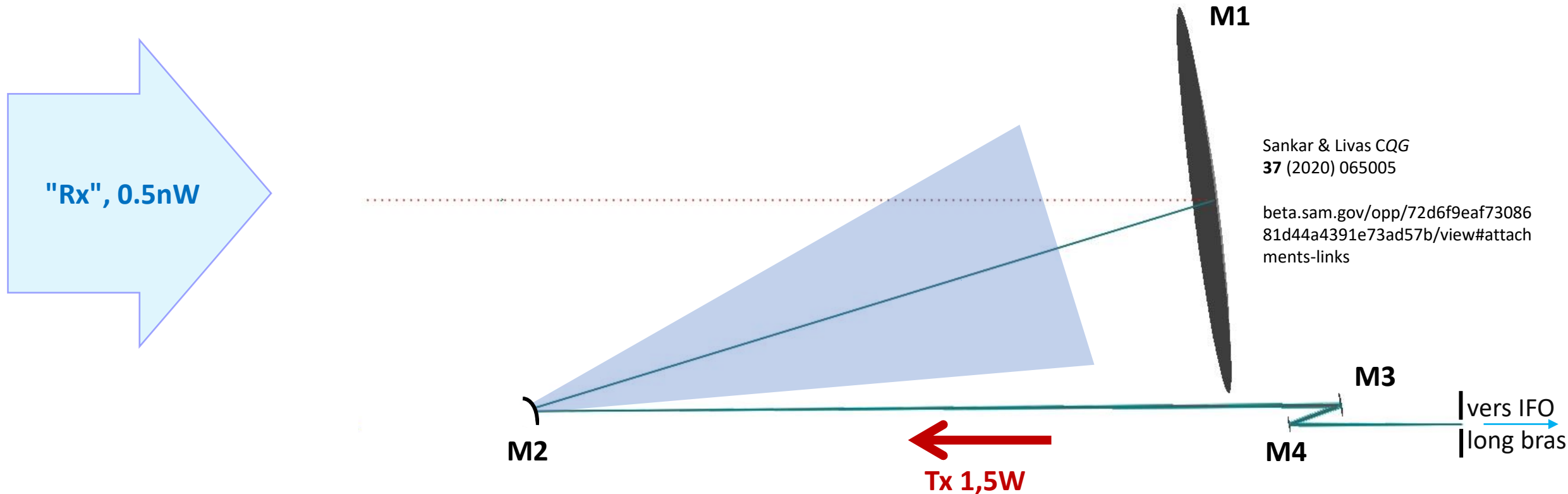
M. Nardello, whova.com/portal/webapp/isco_202103/Agenda/1410017

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 ?

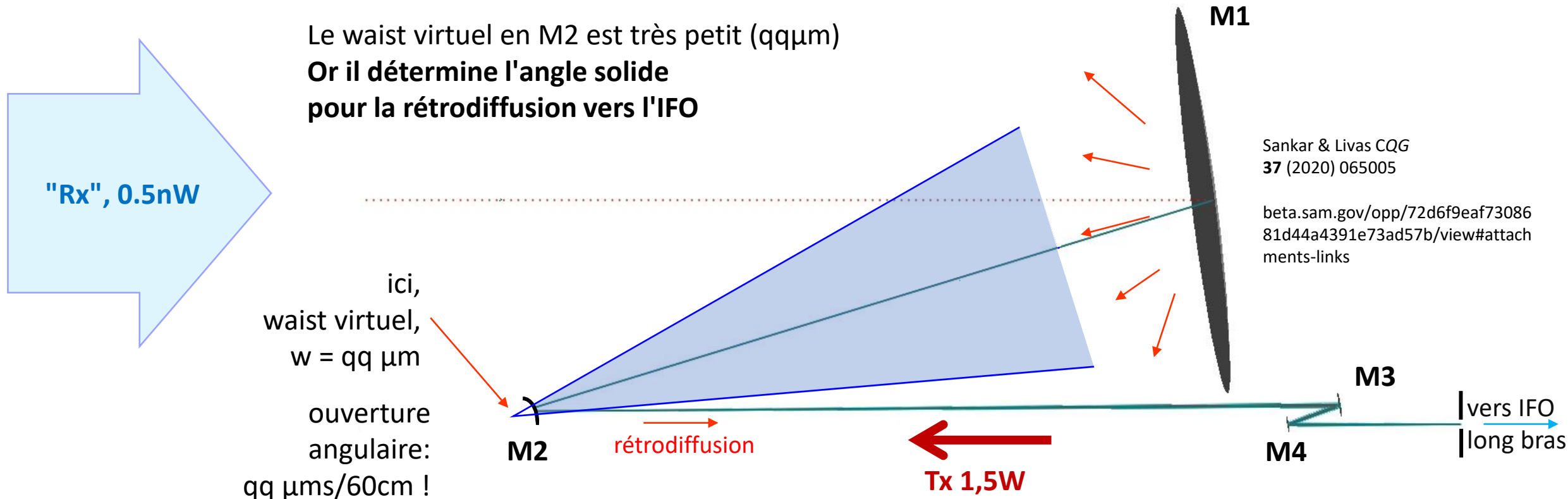


Utilité d'une estimation grossière mais analytique

Calculs sous FRED, Zemax de la rétrodiffusion 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 ?



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 ≈ 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

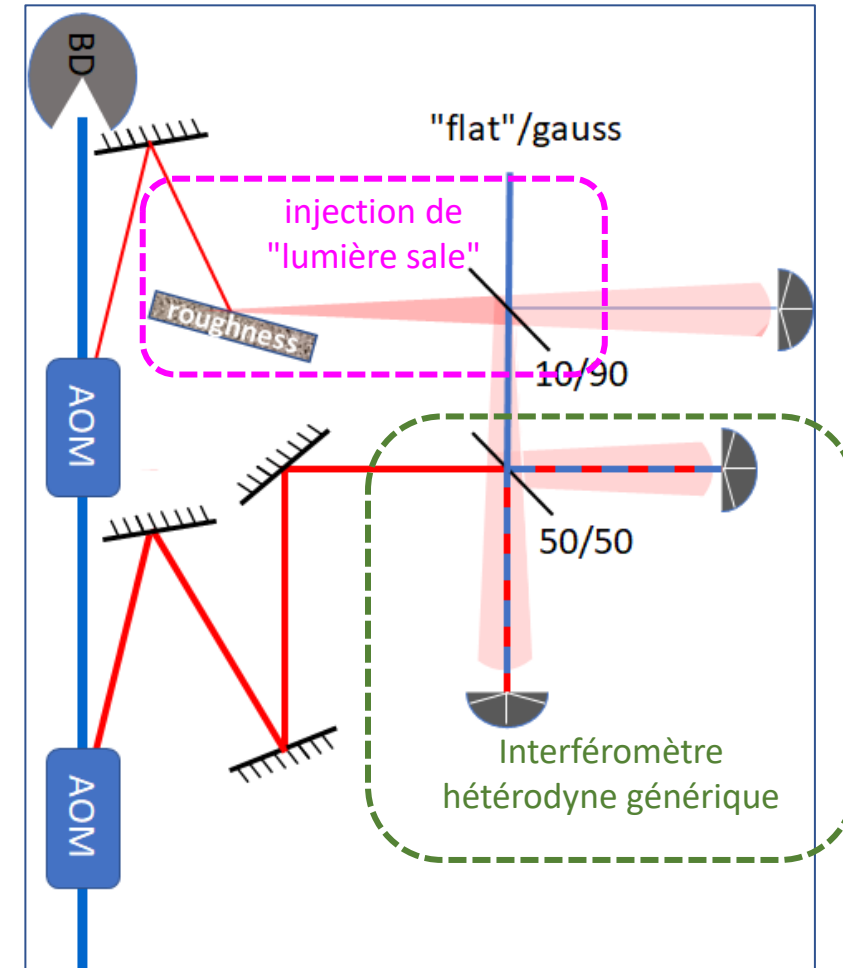
- la fibre de back-link: peut-on garantir une meilleure soustraction de la contribution SL ? (jusqu'ici 90%)
- le "halo" de lumière diffusée $\Delta\lambda$ (bruit de phase important)
- réflexion sur les lames de polarisation mobiles (stabilité spécifiée à 3.8nm)
- la lumière parasite dans l'interféromètre 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

