



Métrologie optique au niveau quantique pour la détection des ondes gravitationnelles

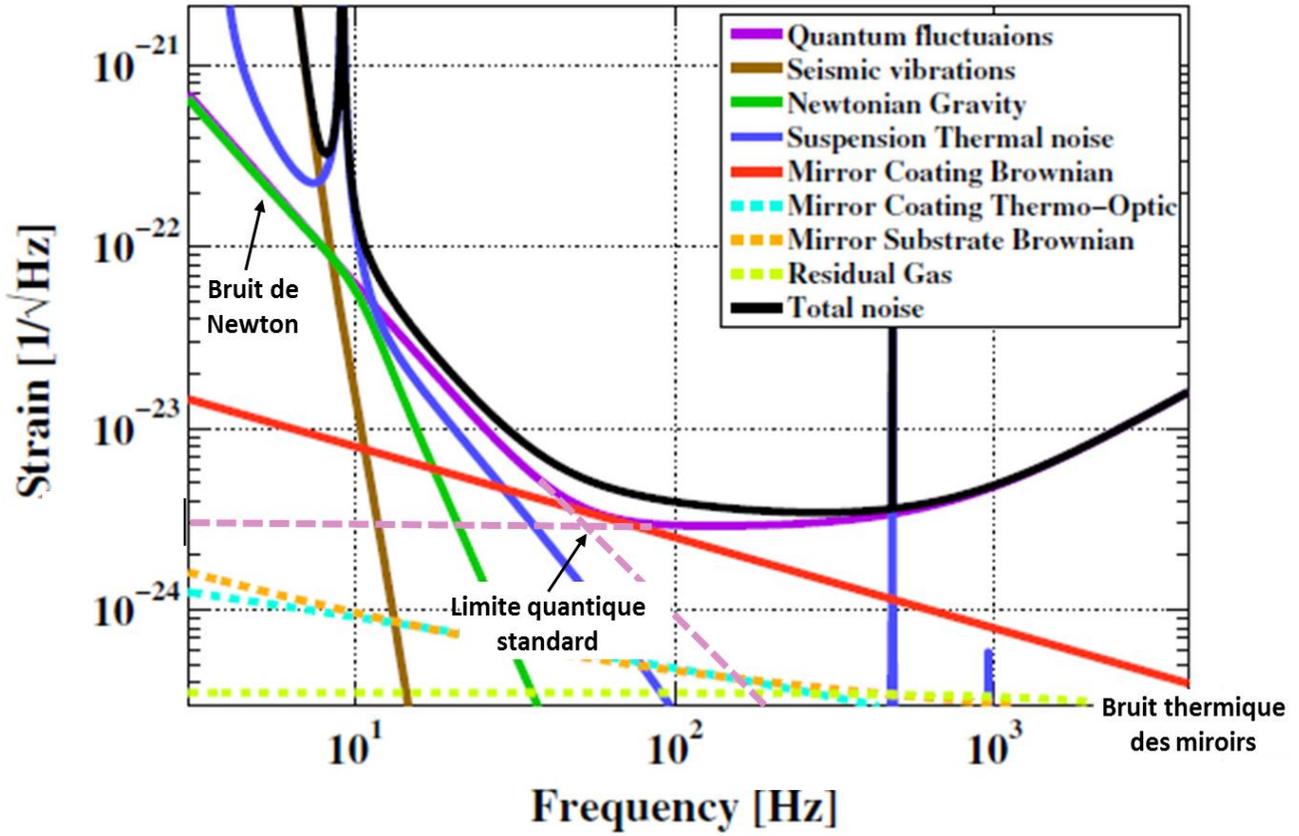
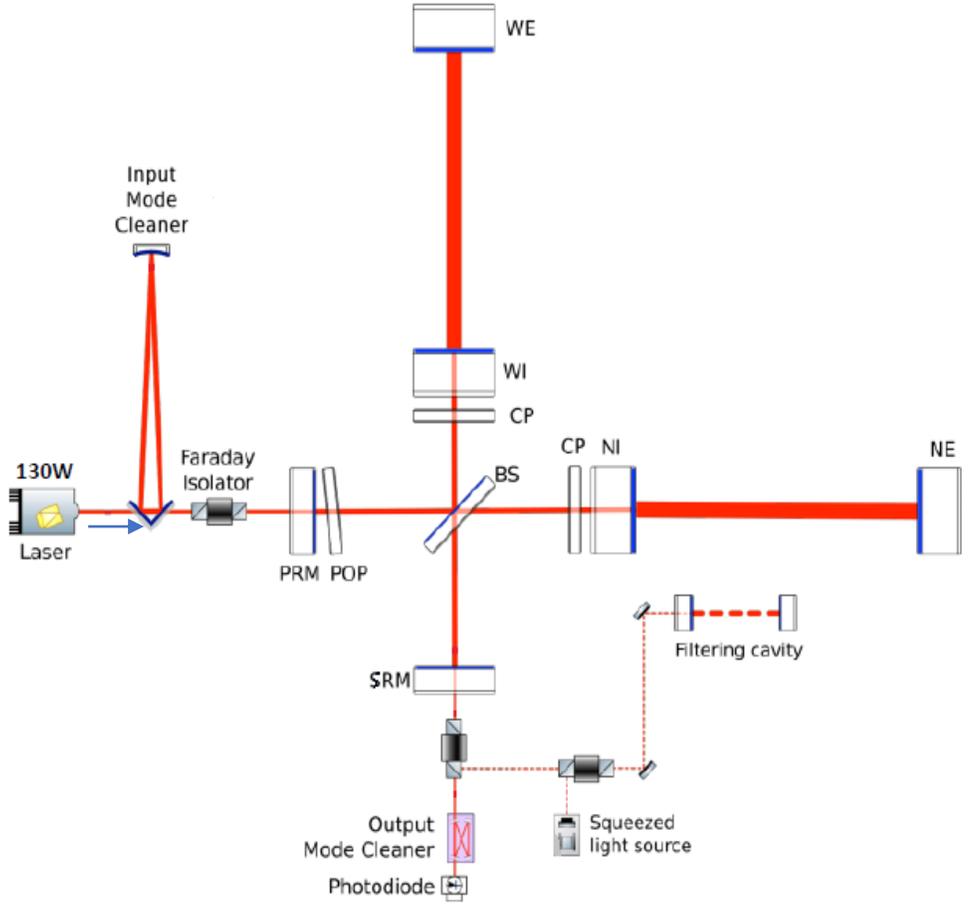
Walid Chaibi

Jean-Pierre Coulon, Mourad Merzougui, Rémi Soulard, Margherita Turconi



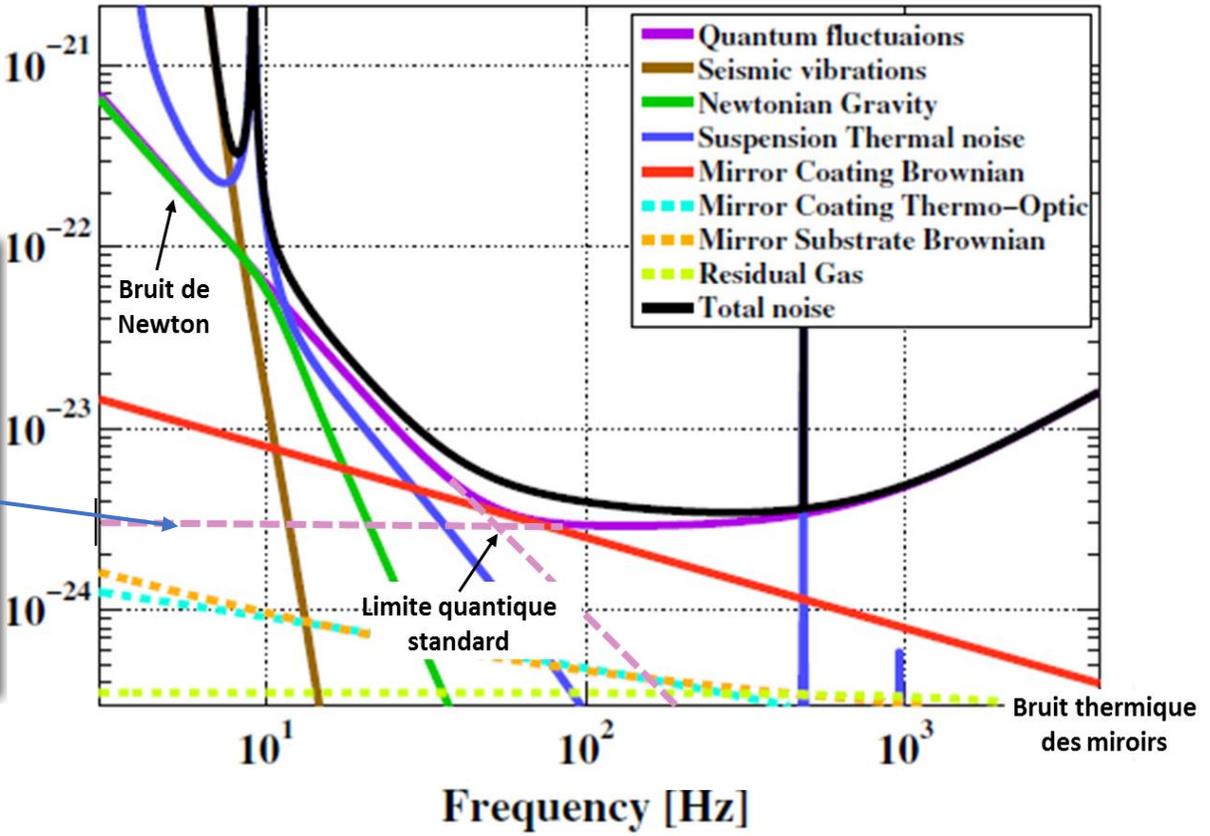
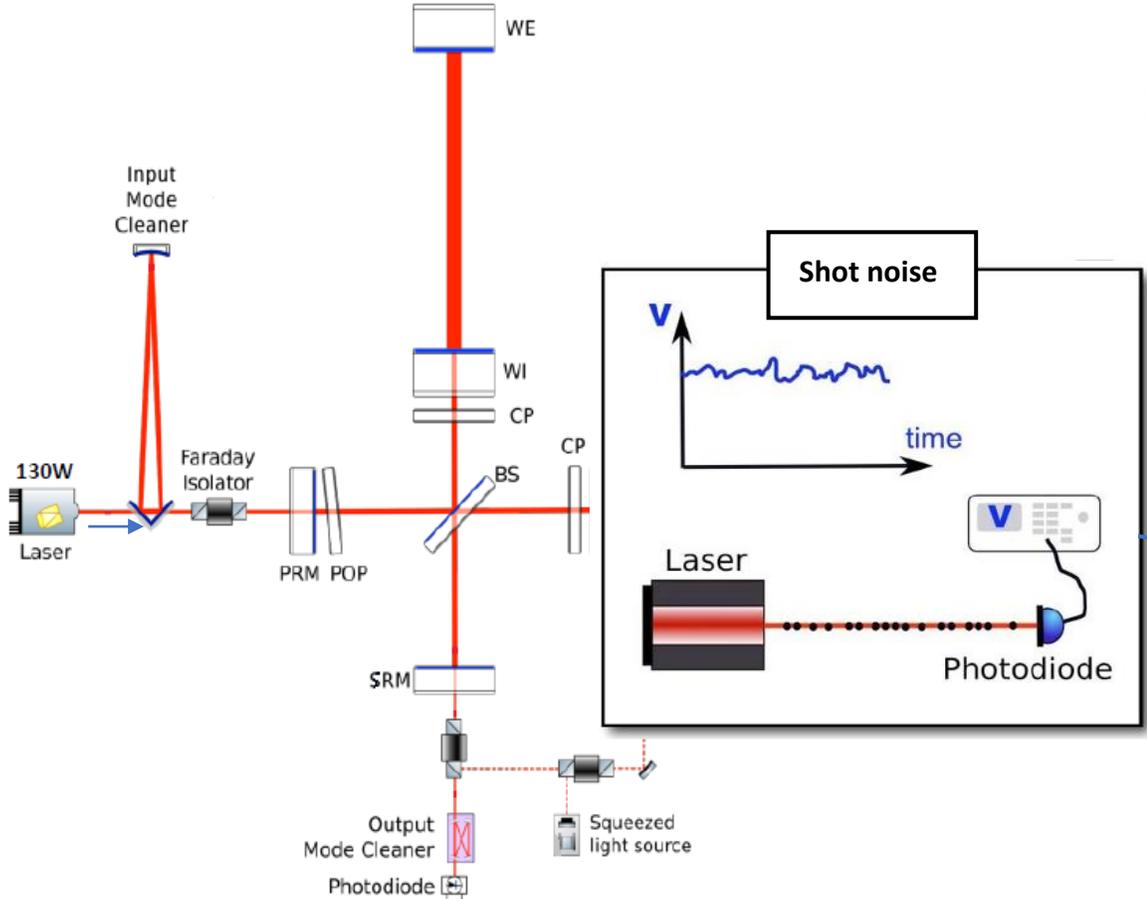
Détecteurs d'ondes gravitationnelles

Un instrument limité presque entièrement par le bruit quantique



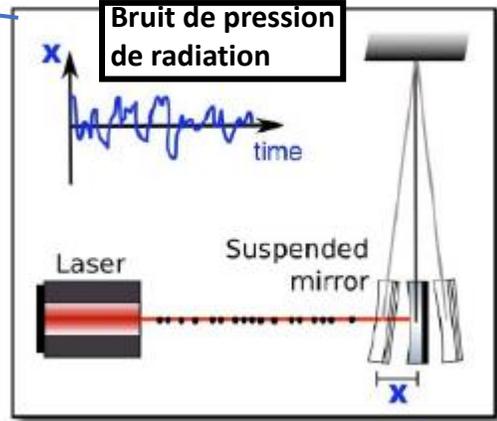
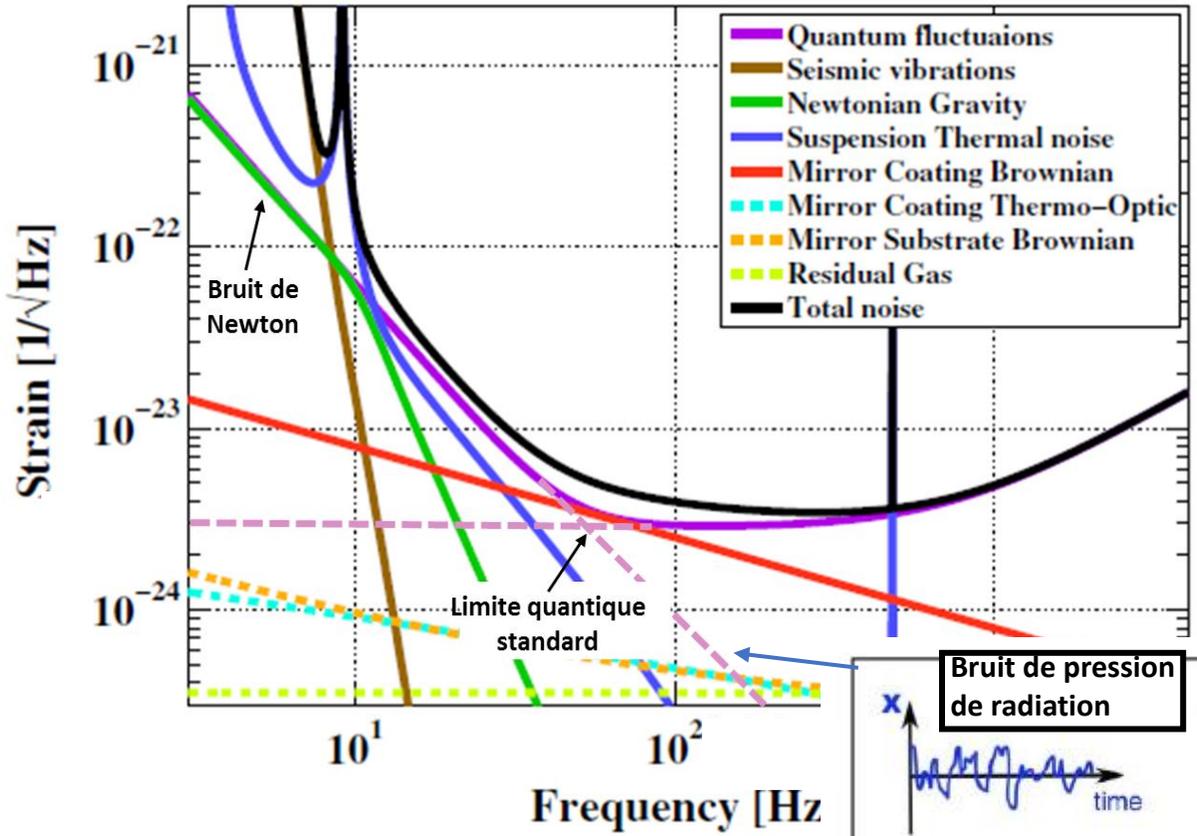
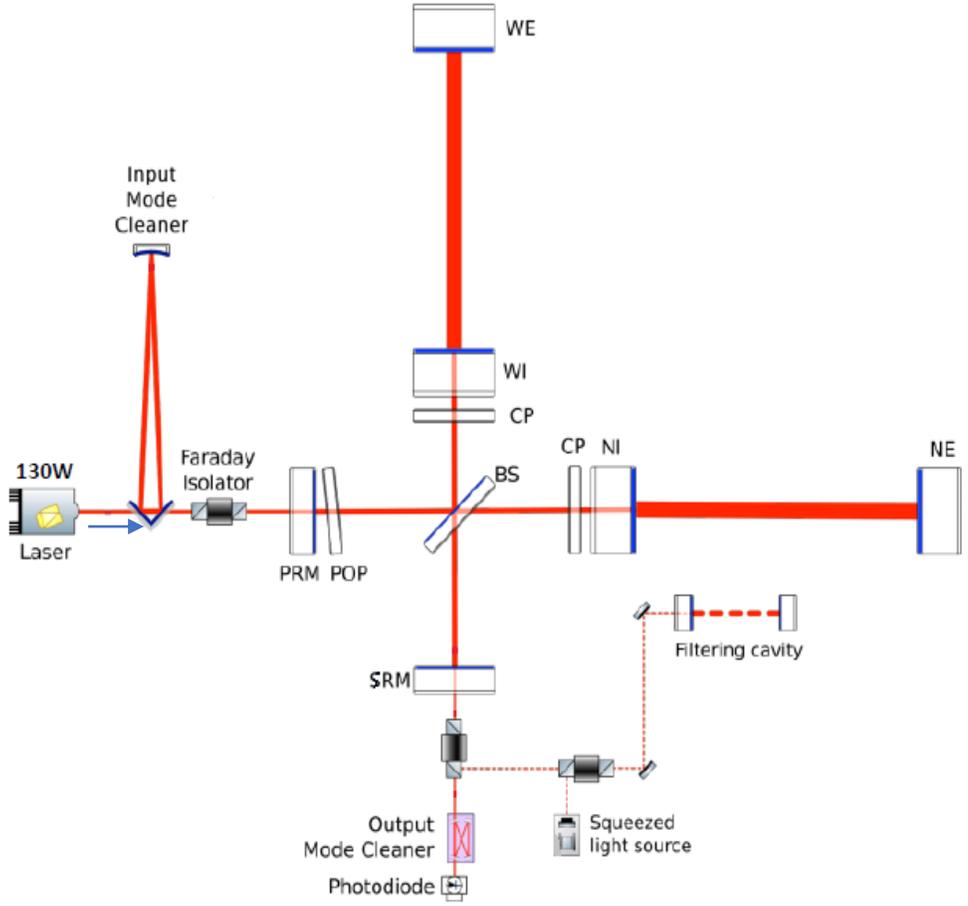
Détecteurs d'ondes gravitationnelles

Un instrument limité presque entièrement par le bruit quantique



Détecteurs d'ondes gravitationnelles

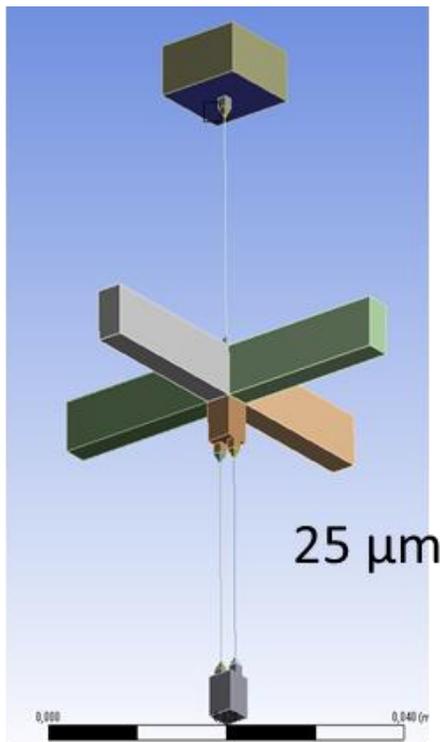
Un instrument limité presque entièrement par le bruit quantique



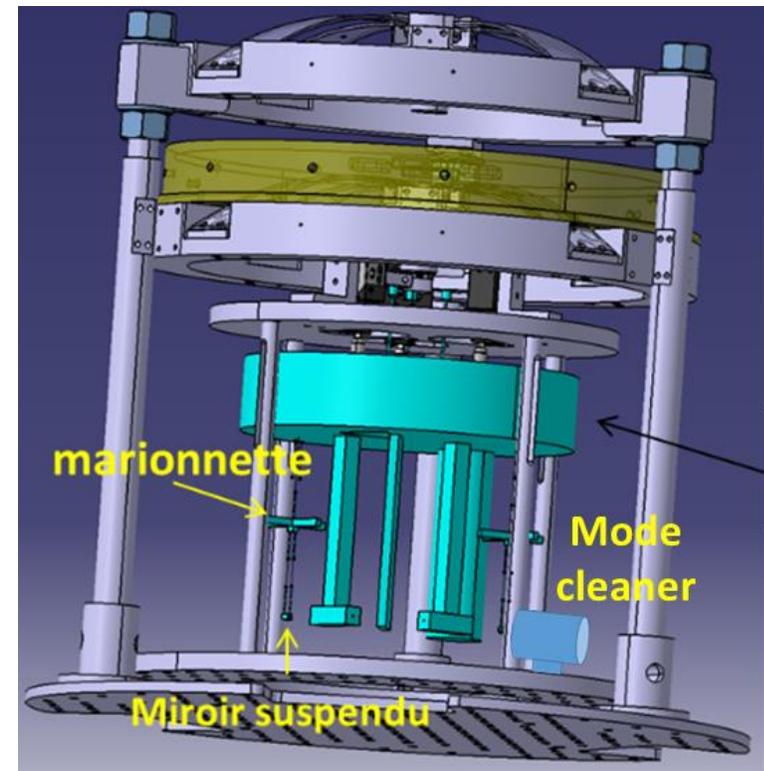
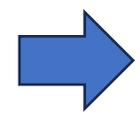
- Vers l'observation du bruit quantique de pression de radiation
- Caractérisation du bruit laser de haute puissance
- Stabilisation de puissance du laser de Virgo

Observation du bruit quantique de pression de radiation

Projet Qurag: interféromètre monolithique

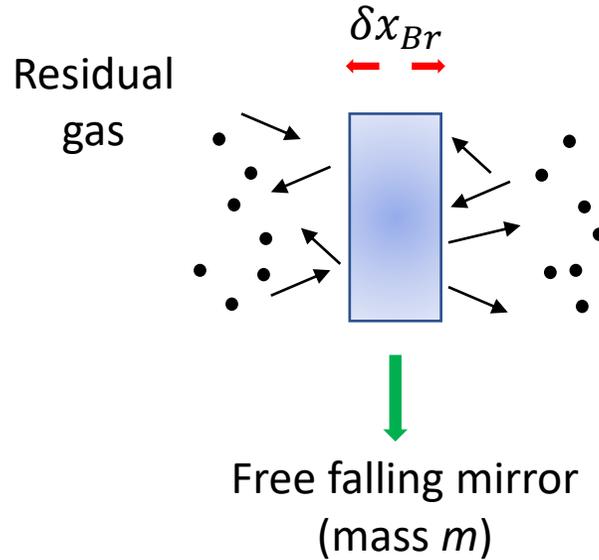


Oscillateur opto-mécanique
bas bruit thermique



Interféromètre
monolithique

Brownian Motion



Langevin theory 1908

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = m \frac{dv}{dt} = -\gamma v + F_L(t)$$

$F_L(t)$: Stochastic Langevin force, results from the momentum transfer of the surrounding particles

γ and F_L have the same physical origin, but what is the relationship between F_L and γ ?

Mirror in thermodynamic equilibrium with a bath at temperature T

$$S_{F_L}(f) = 4\gamma k_B T$$



Generalized by Callen & Welton(1952) : **Fluctuation-Dissipation Theorem**

Dissipation \Rightarrow Fluctuation :

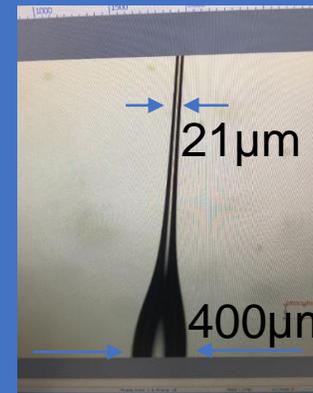
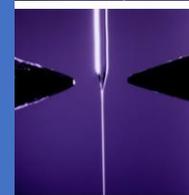
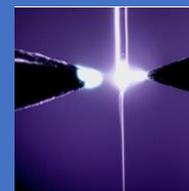
- Any mechanical system
- Any dissipation mechanism

Comment réduire le bruit thermique?

- Suspensions monolithiques
- Moins de dissipation → grand facteur de qualité

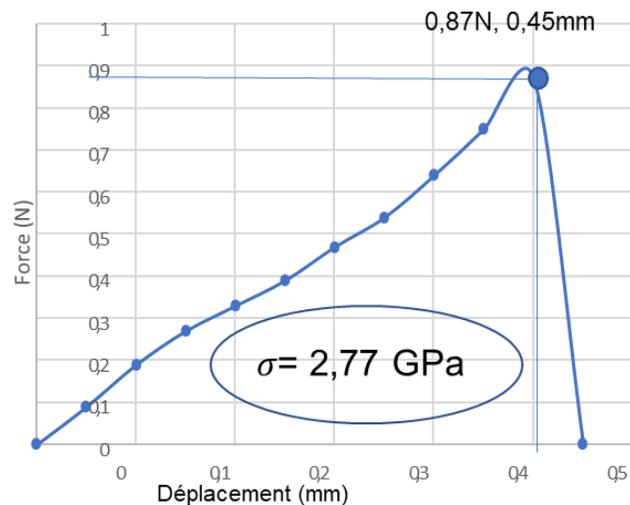
Tirage contrôlé à partir d'une fibre en silice de 400µm

Tirage de fibre :
plasma haute T°

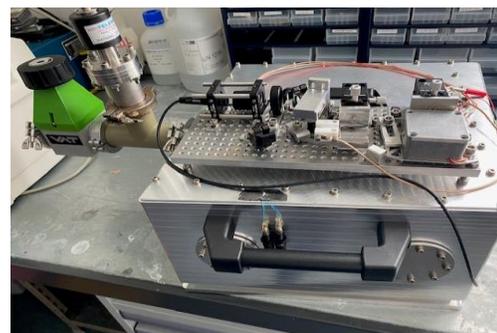
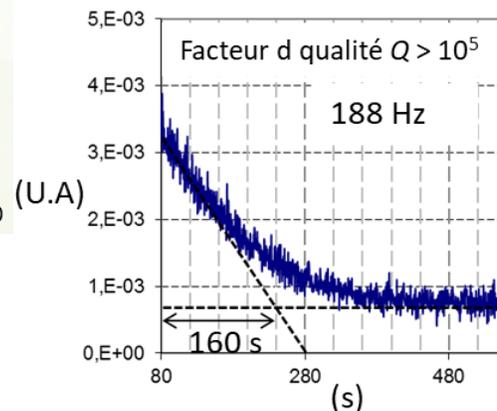
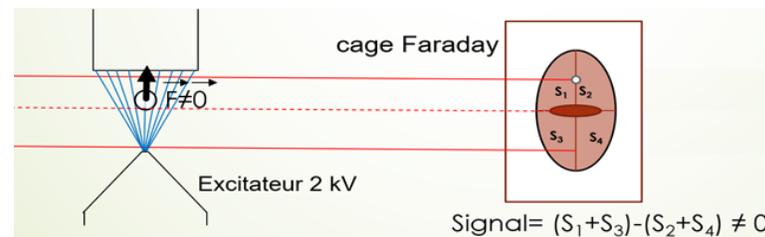


Caractérisation de la suspension

Contrainte de rupture



Mesure du facteur de qualité mécanique

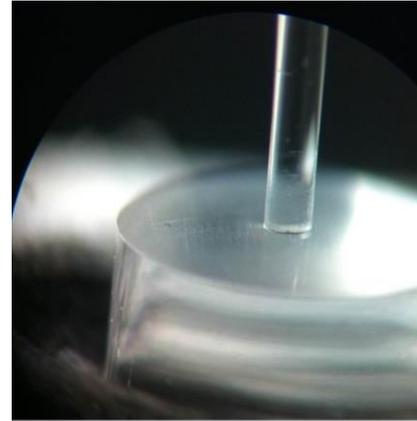


Ring down d'un
mode violon

Tests de techniques de collage

1) Collage fibre-miroir : soft silicate bonding

- Épaisseur 2 μm
- Contrainte de rupture $\vartheta_r \sim 1,4 \text{ MPa}$



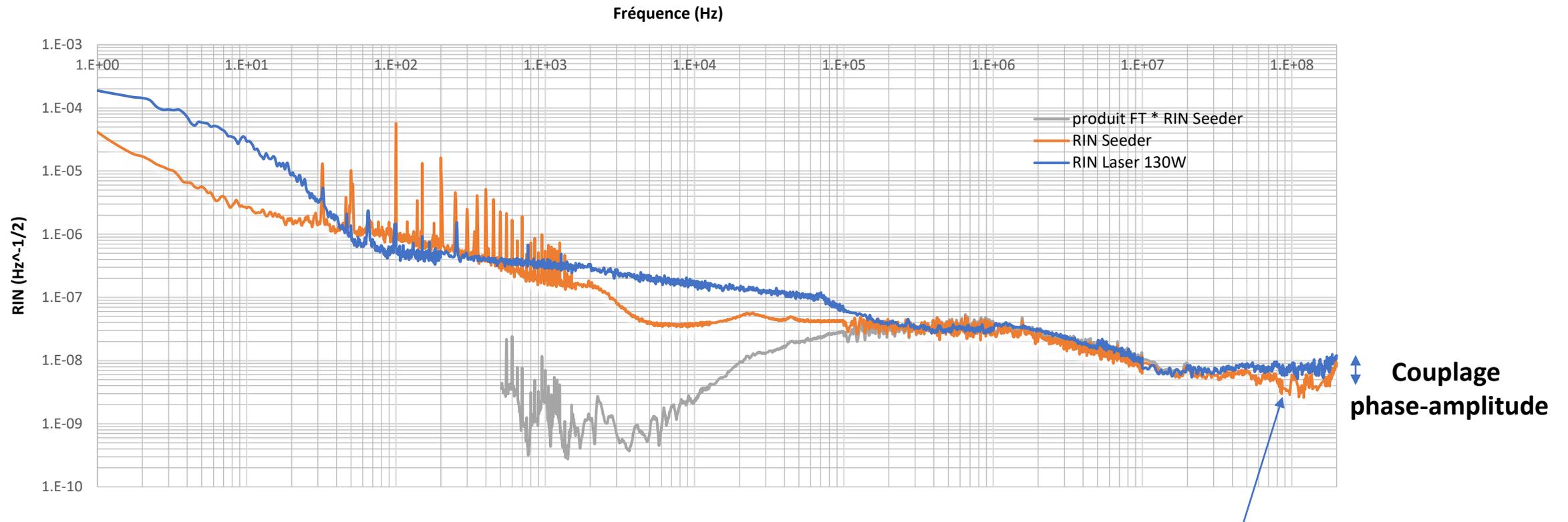
2) Fusion par laser CO₂ → moins de bruit thermique



En cours de développement...

Caractérisation du bruit laser de haute puissance

➔ Mesure RIN sur une large bande de fréquence

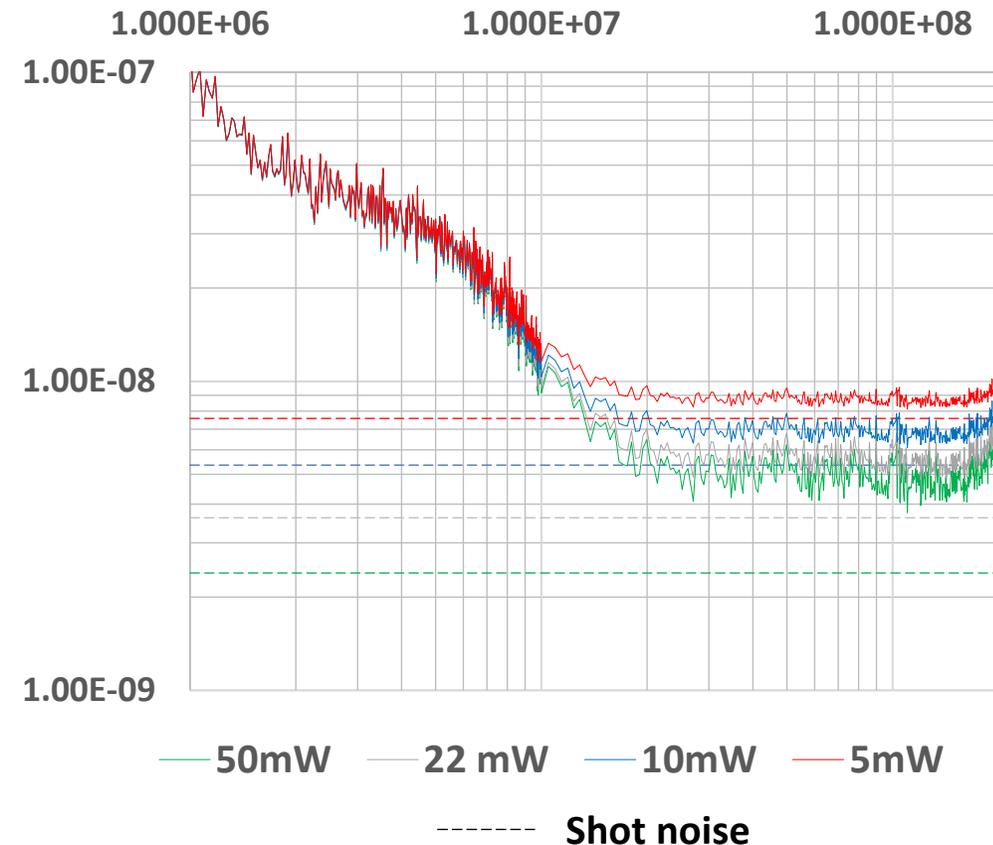
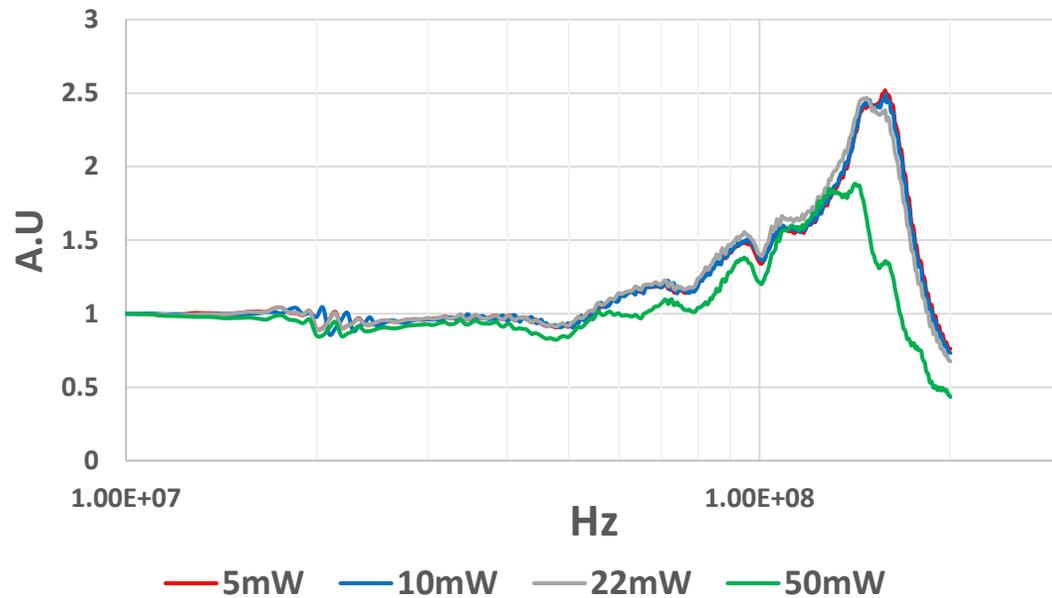
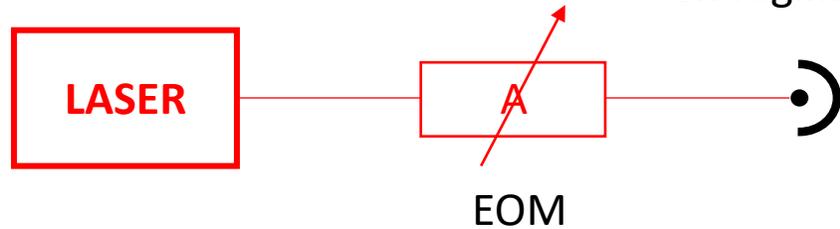


Mesure RIN haute fréquence 10MHz-100MHz :
Photodiode InGaAs 500 μm ; saturation à 5mW

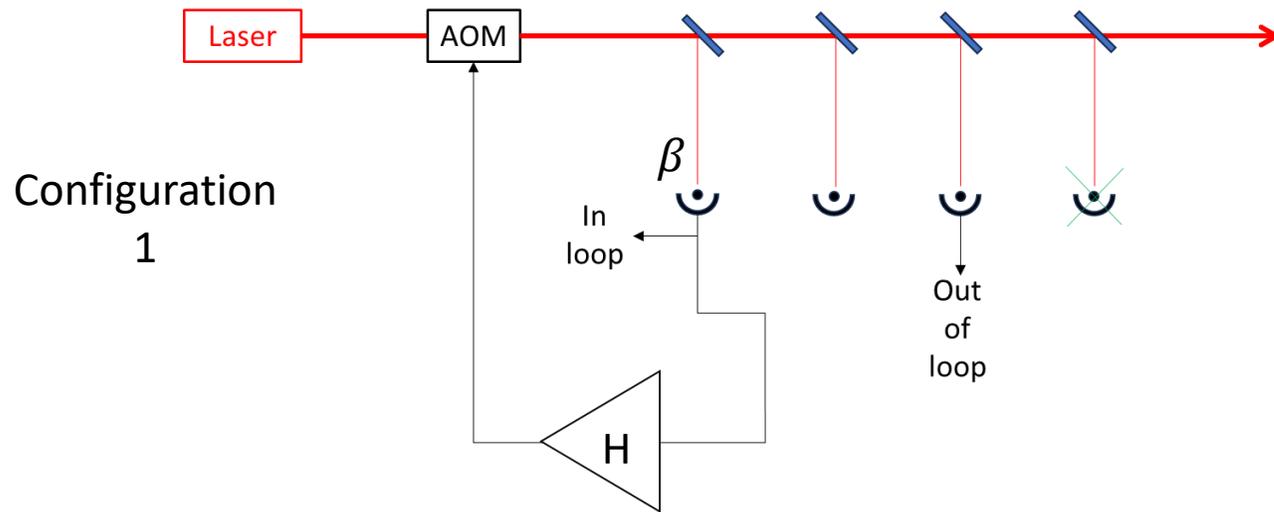
Caractérisation du bruit laser de haute puissance

Mesure de fonctions de transfert

Photodiode (AC)
en régime saturé



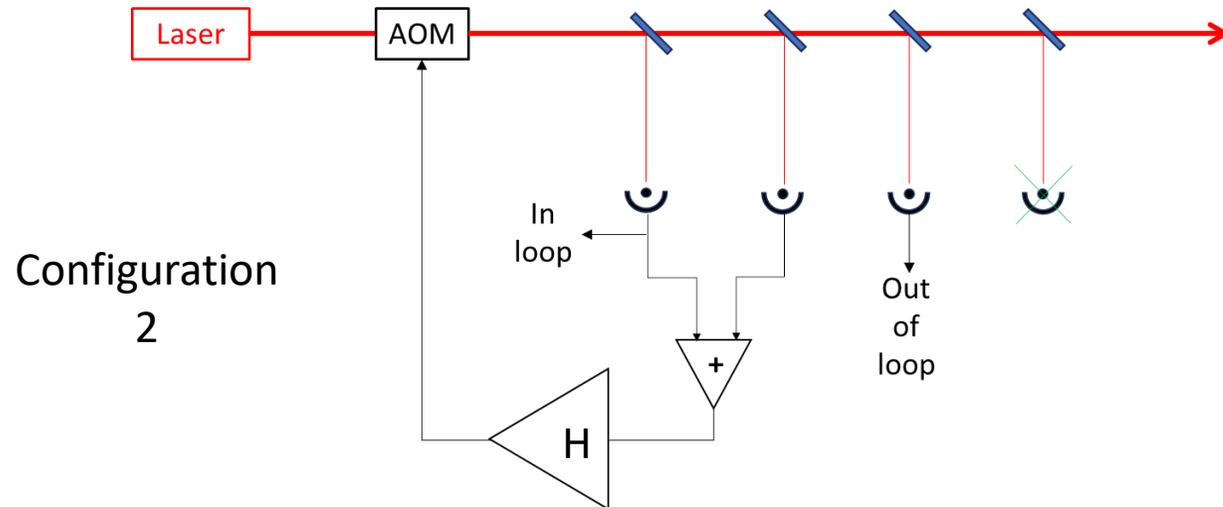
Stabilisation de puissance pour Virgo



$$\delta P_{IL} = \beta \delta P / (1 + H)$$

$$\delta P_{OoL} = \sqrt{2\beta} \delta P_{shot}$$

$$RIN = \frac{\delta P}{P} = \frac{RIN_{OoL}}{\sqrt{2}}$$



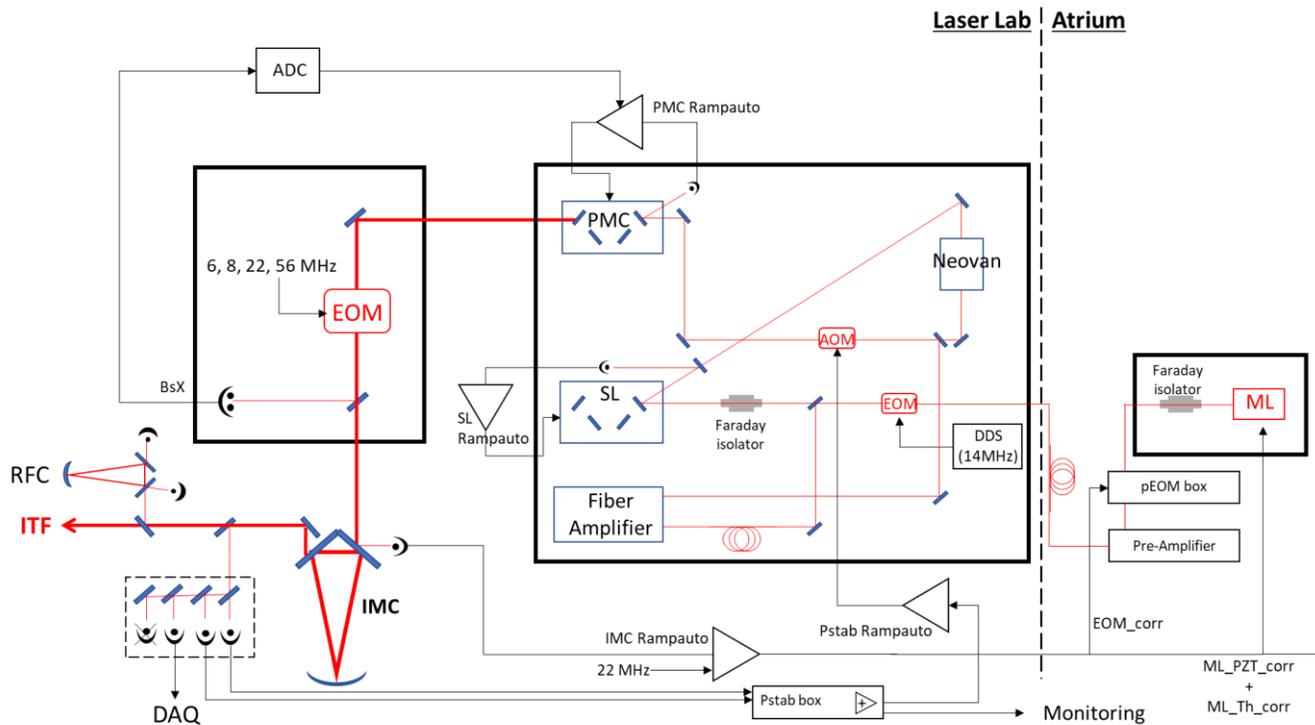
$$\delta P_{IL} = \sqrt{\frac{\beta}{2}} \delta P_{shot}$$

$$\delta P_{OoL} = \sqrt{\frac{3}{2}} \beta \delta P_{shot}$$

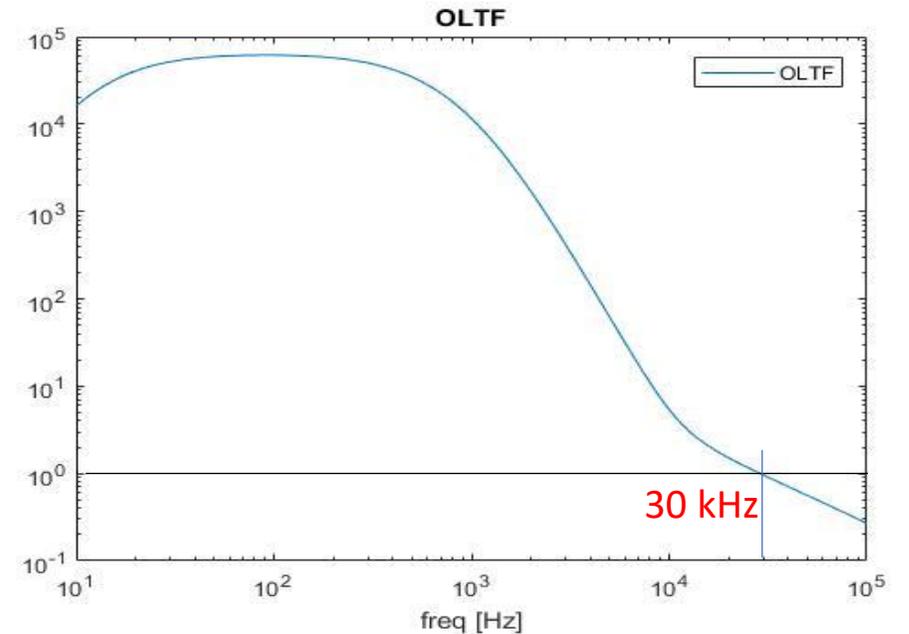
$$RIN = \frac{\delta P}{P} = \frac{RIN_{OoL}}{\sqrt{3}}$$

Configuration initial: Cleva et al. *Laser Power Stabilization for Advanced Virgo* [hal-03544164](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03544164)

Stabilisation de puissance pour Virgo

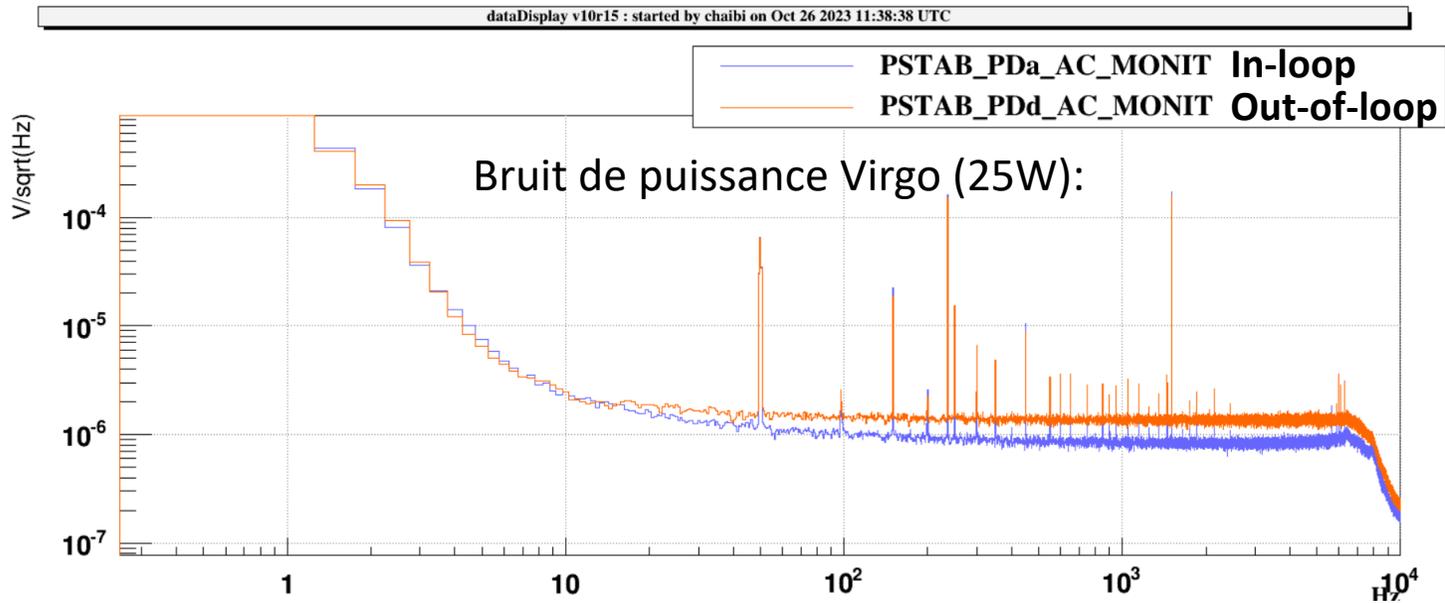


Système PSL (Pre Stabilized Laser)

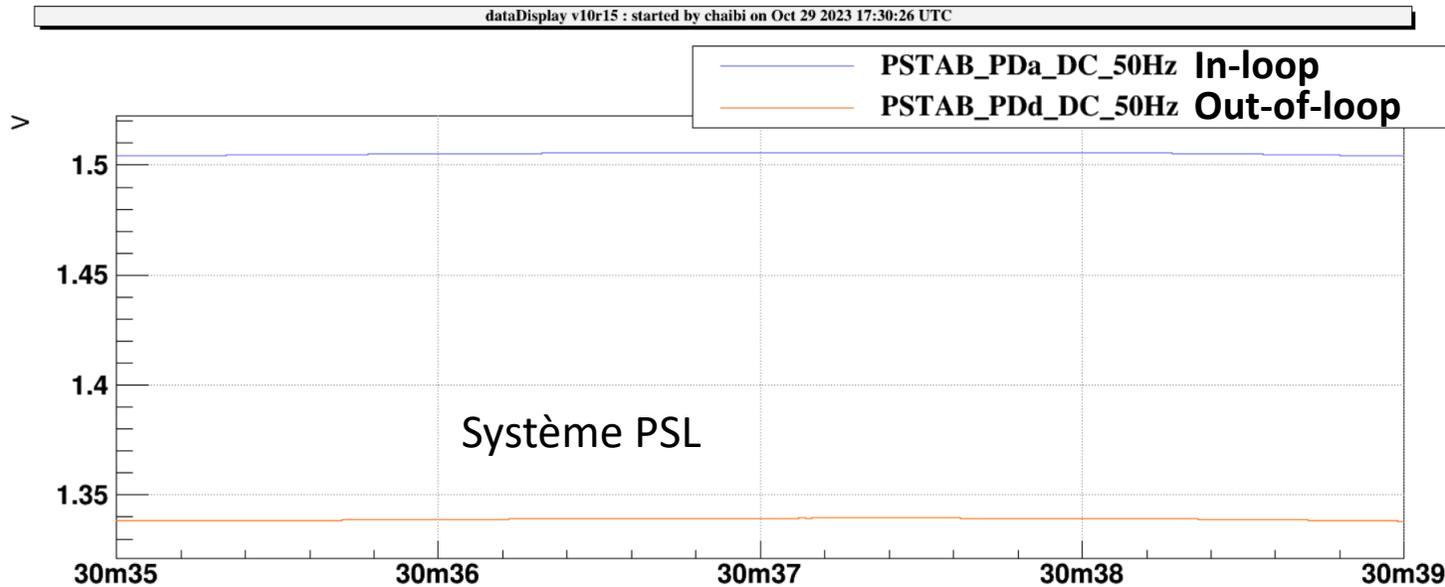


Fonction de transfert boucle ouverte du servo Electronique μ

Stabilisation de puissance pour Virgo



$$RIN = 4.5 \cdot 10^{-9} \text{ Hz}^{-1/2}$$



1382635853.0000 Oct29 2023 17:30:35 UTC

WS TF&Q

- Les bruits d'origine quantique limitent les mesures des détecteurs d'ondes gravitationnelles.
- Ou presque...La limitation par le bruit de pression de radiation n'est pas une évidence, à ARTEMIS le projet Qurag vise à le mesurer.
- Les détecteurs requièrent un 'asservissement de la puissance du laser à un niveau de shot noise de quelque $10^{-9} \text{ Hz}^{-1/2}$