

Micro-résonateurs et pression de radiation : vers l'optomécanique quantique



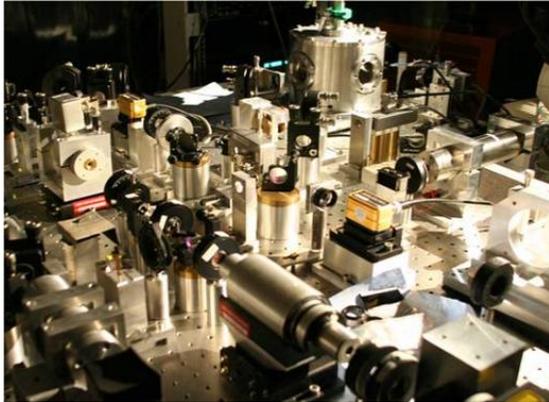
Antoine Heidmann

Pierre-François Cohadon, Tristan Briant

Thomas Antoni, Michaël Bahriz,
Aurélien Kuhn, Chiara Molinelli,
Alexandros Tavernarakis,
Pierre Verlot

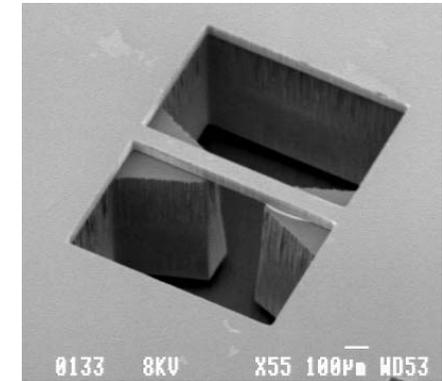


Vers l'optomécanique quantique...

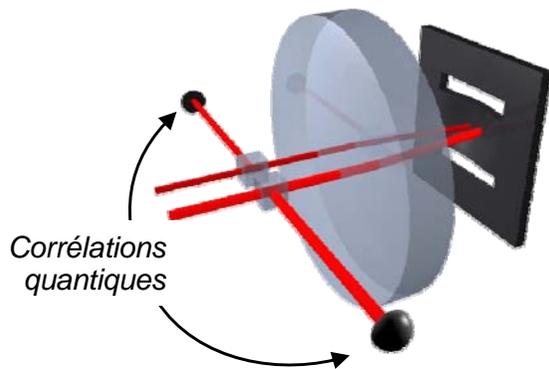


1 – Mesure optique ultra-sensible des déplacements d'un résonateur mécanique

→ *Voir l'influence de la pression de radiation*

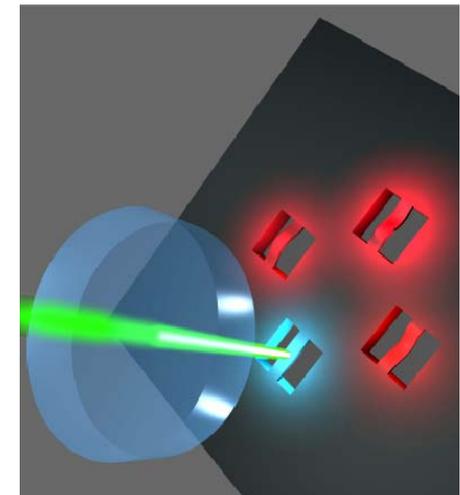


2 – Couplage optomécanique entre la lumière et un système mécanique

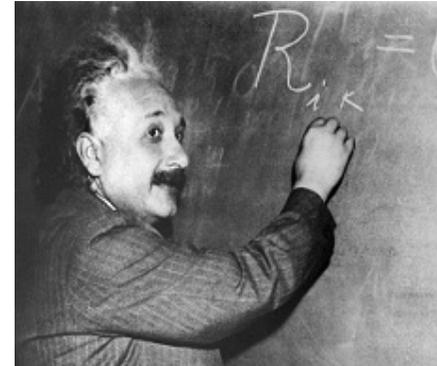
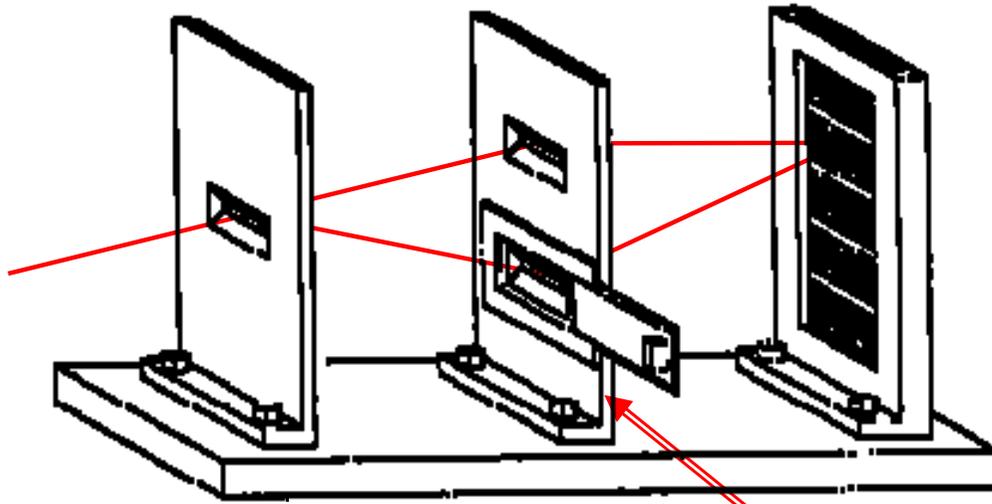


→ *Action en retour dans les mesures, contrôler le bruit de la lumière*

→ *Agir au niveau quantique sur un système mécanique macroscopique*



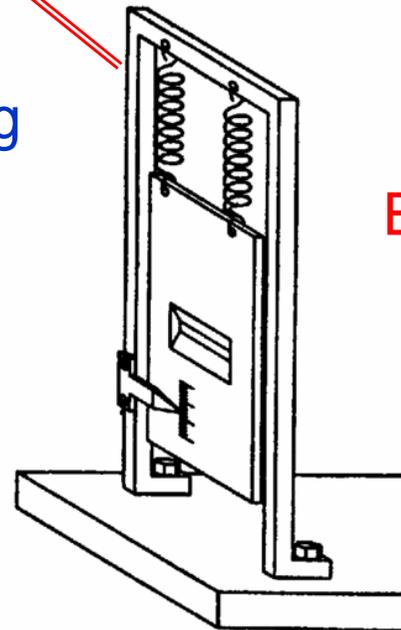
Premier système optomécanique quantique en 1920 ?



Débat Bohr – Einstein sur les interférences par fentes d'Young

Mesure du chemin suivi par le photon grâce au recul dû à la pression de radiation

→ *Les interférences disparaissent-elles ?*

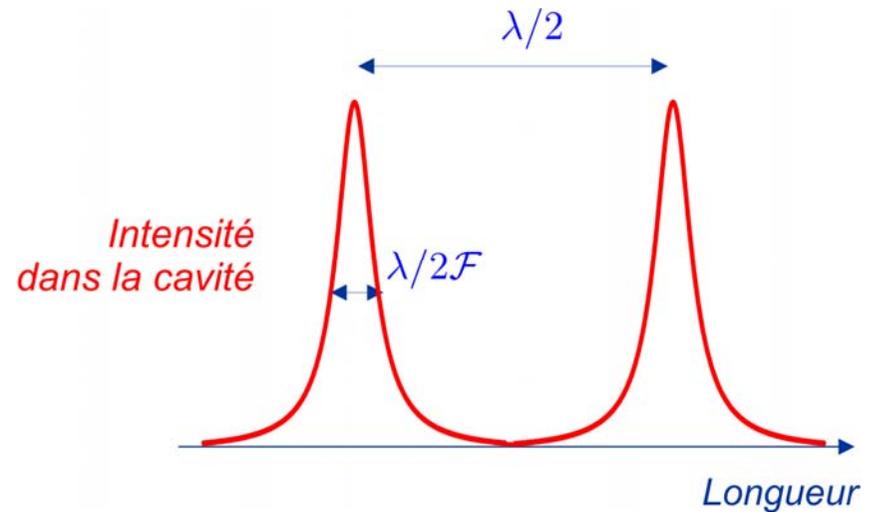
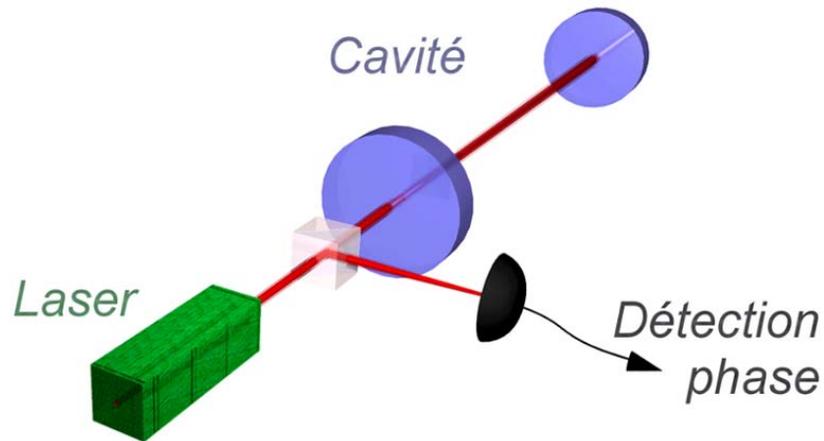


Expérience difficile à réaliser...

Nécessite une mesure très sensible du recul, et un système très mobile !

Mesure optique avec une cavité de grande finesse

Mesure de la longueur de la cavité

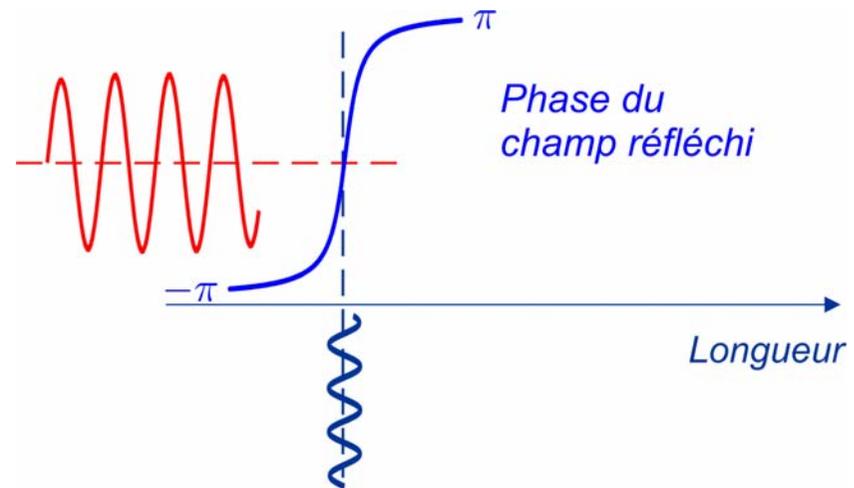


Largeur de la résonance : $\lambda/2\mathcal{F}$

\mathcal{F} : finesse de la cavité

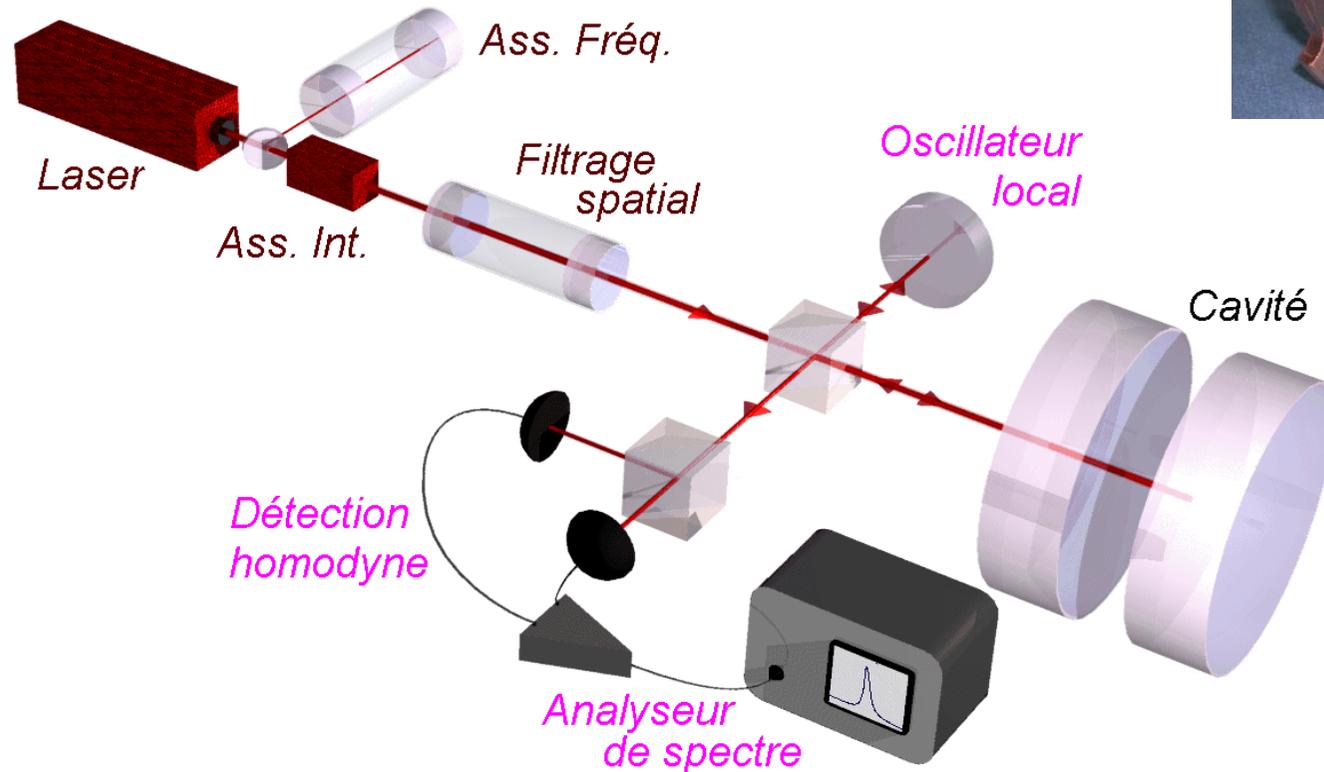
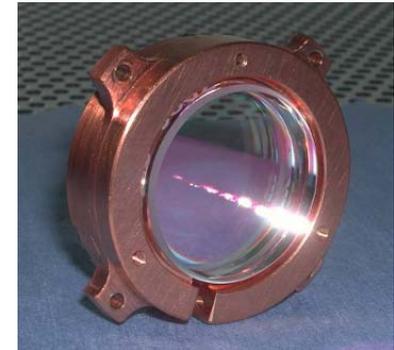
L'effet du déplacement d'un miroir est amplifié par la finesse :

$$\delta\varphi_{\text{out}} \simeq \mathcal{F} \frac{\delta L}{\lambda}$$



Expériences au LKB

Mesure des déplacements d'un miroir avec une cavité de grande finesse ($\mathcal{F} > 300\,000$)



Sensibilité $\simeq 10^{-20}$ m/ $\sqrt{\text{Hz}}$

Représente 1/100 000 de la taille d'un noyau !

Phys. Rev. Lett. **83**, 3174 (1999)

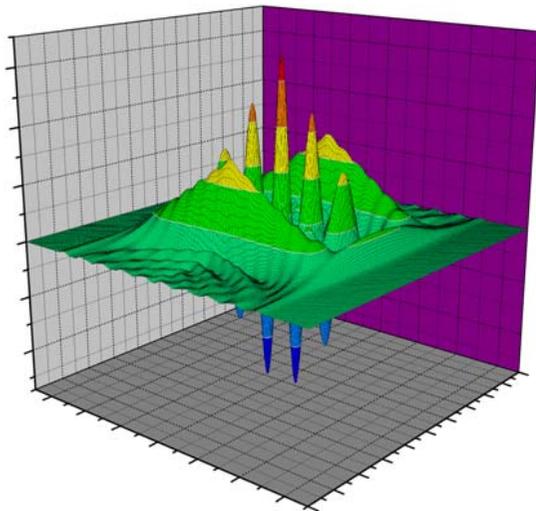
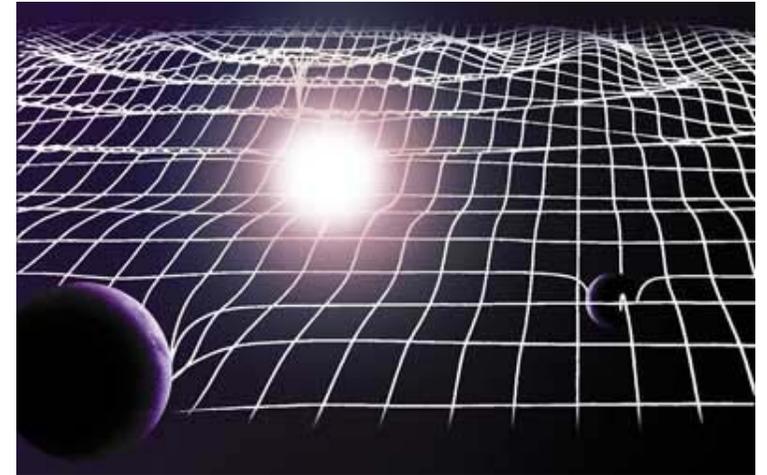
Phys. Rev. Lett. **99**, 110801 (2007)

Mesurer au-delà de l'attomètre, pour quoi faire ?



→ Les miroirs bougent !

→ Détecter les ondes gravitationnelles



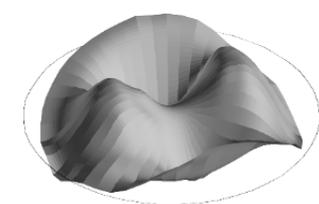
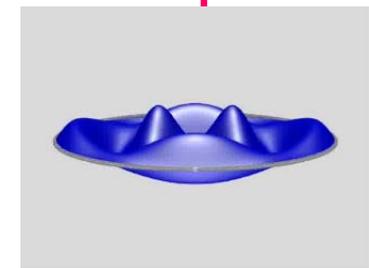
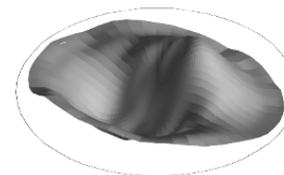
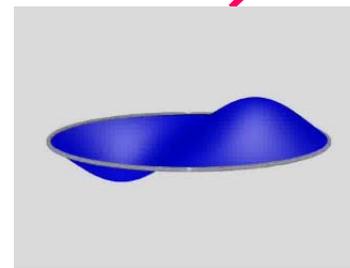
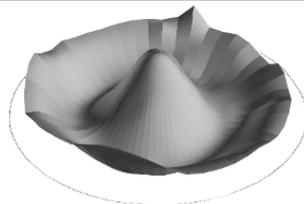
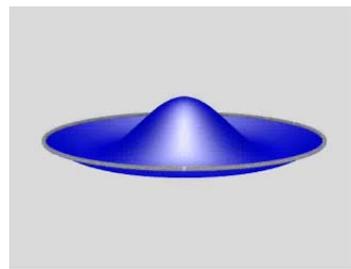
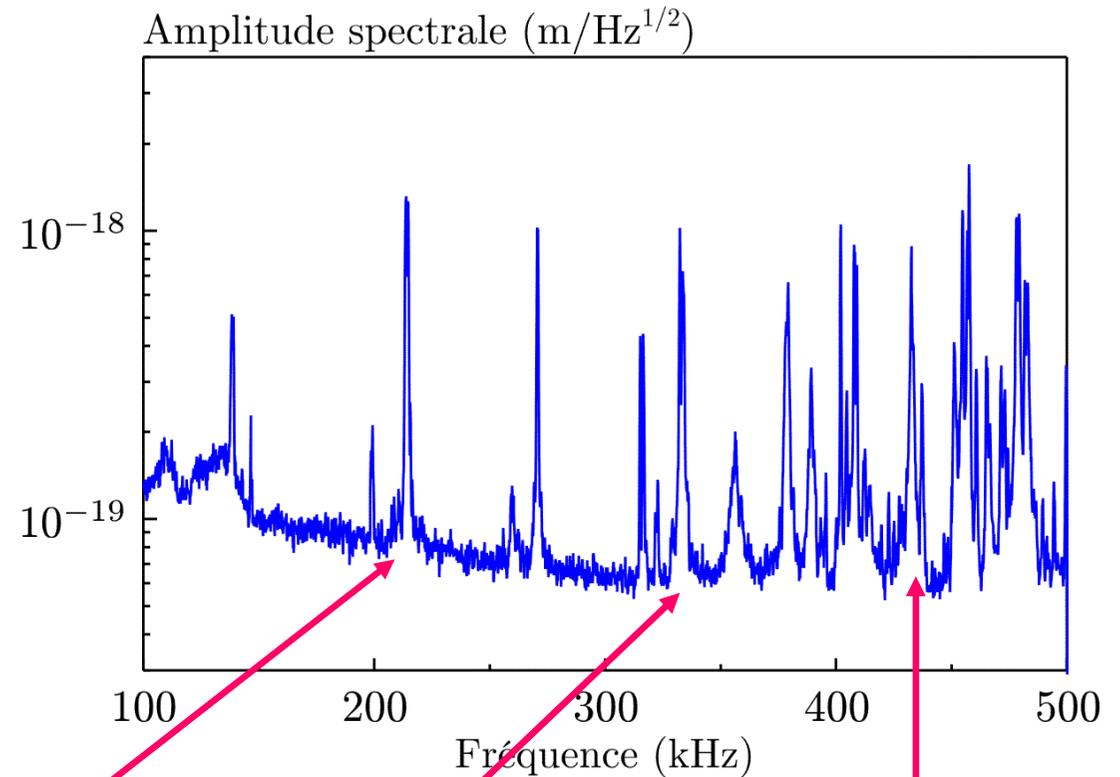
→ Voir les fluctuations quantiques d'un objet macroscopique

Les miroirs bougent !

L'analyse en fréquence des déplacements fait apparaître des résonances

→ Modes de vibration d'un miroir cylindrique

→ Agitation thermique



Evolution d'un mode dans l'espace des phases

Un mode est équivalent à un oscillateur harmonique :

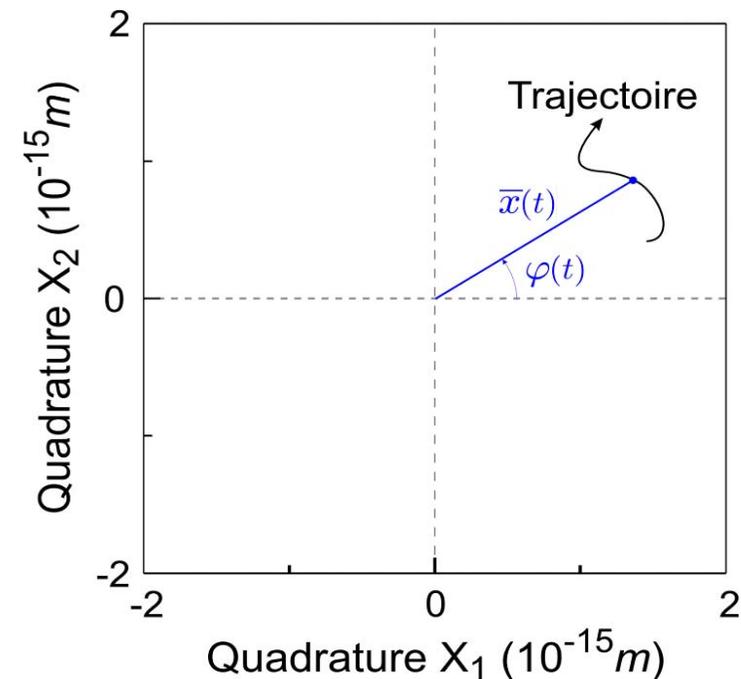
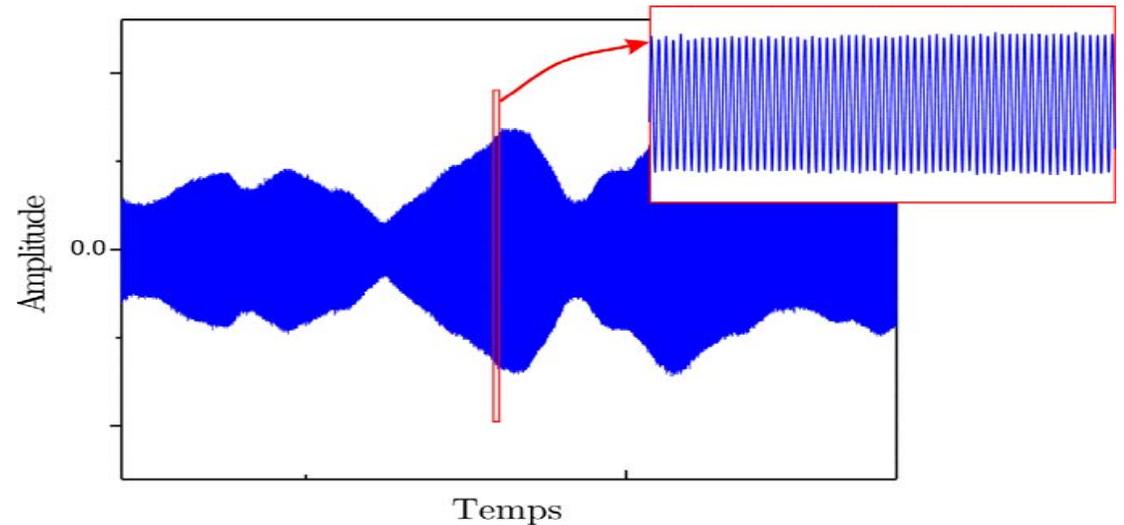
Fréquence $\Omega_m/2\pi$,
masse M , facteur de qualité Q

Oscillation avec une amplitude et une phase variant lentement

Trajectoire dans l'espace des phases :

$$\begin{aligned}x(t) &= \bar{x}(t) \cos(\Omega_m t + \varphi(t)) \\ &= X_1(t) \cos(\Omega_m t) + X_2(t) \sin(\Omega_m t)\end{aligned}$$

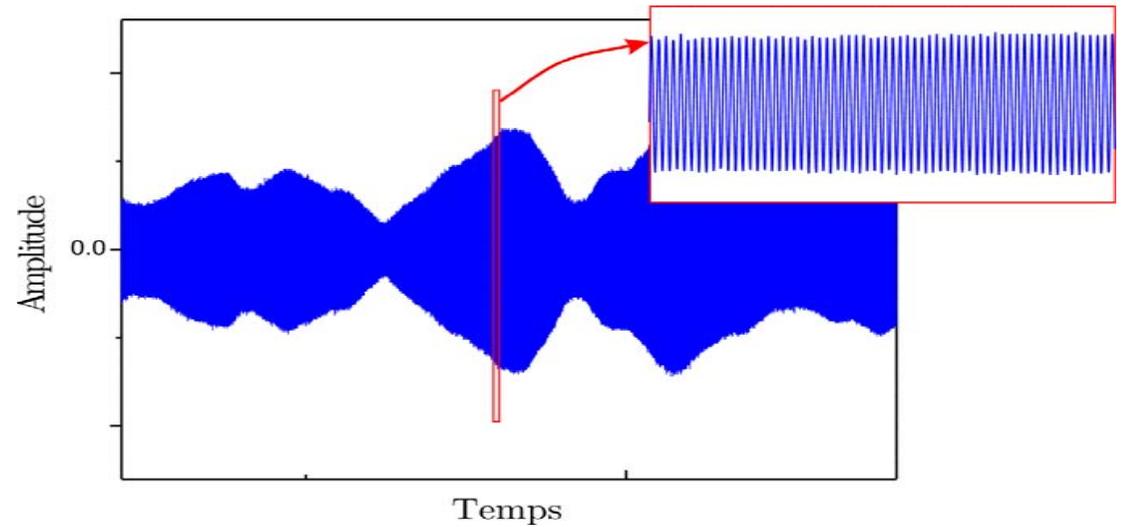
→ Mouvement Brownien 2D



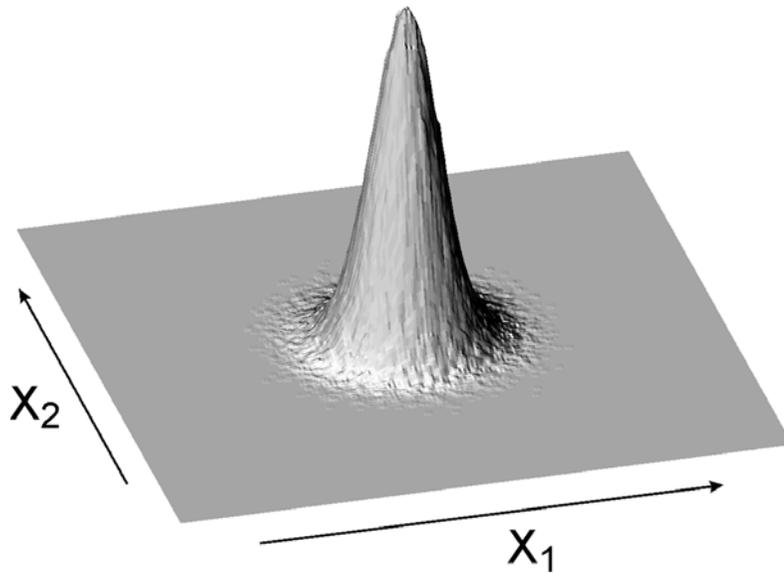
Evolution d'un mode dans l'espace des phases

Un mode est équivalent à un oscillateur harmonique :

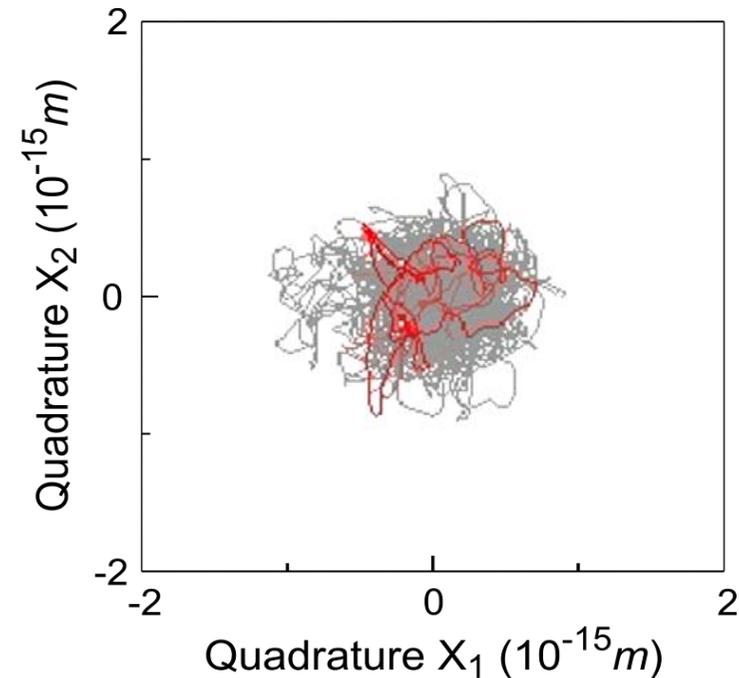
Fréquence $\Omega_m/2\pi$,
masse M , facteur de qualité Q



→ Distribution thermique Gaussienne :

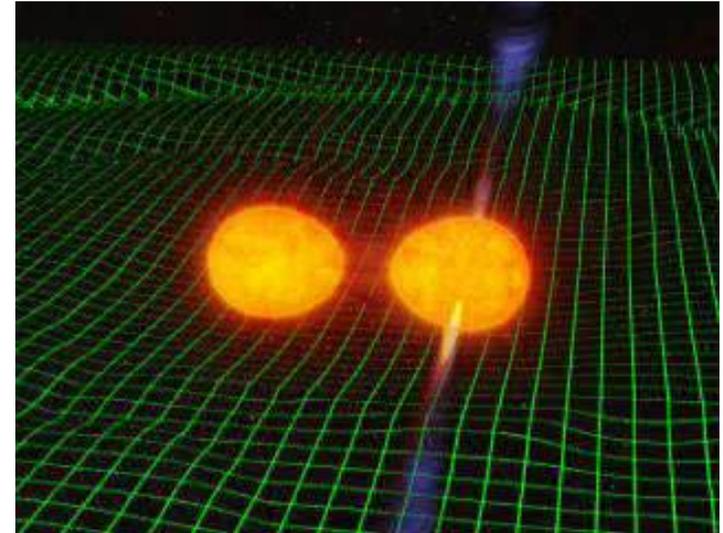
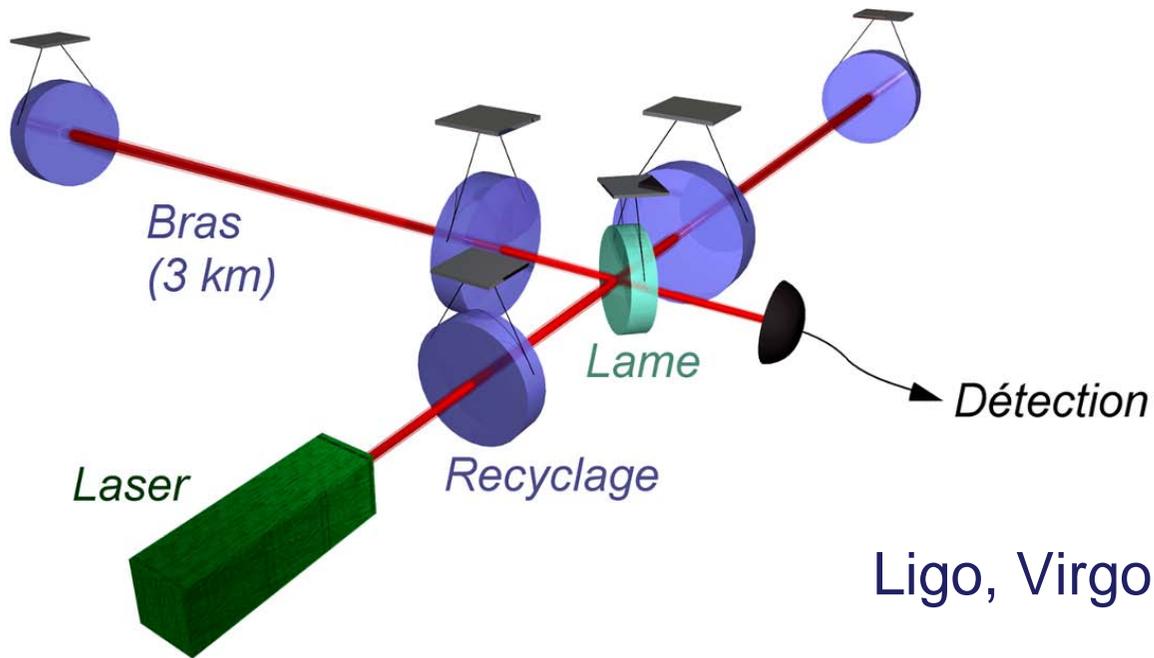


$$\Delta X_1 = \Delta X_2 = \sqrt{\frac{k_B T}{M \Omega_m^2}} \sim 10^{-15} \text{ m}$$



Détecter les ondes gravitationnelles

Détection d'évènements violents
(fin de vie d'un système binaire)

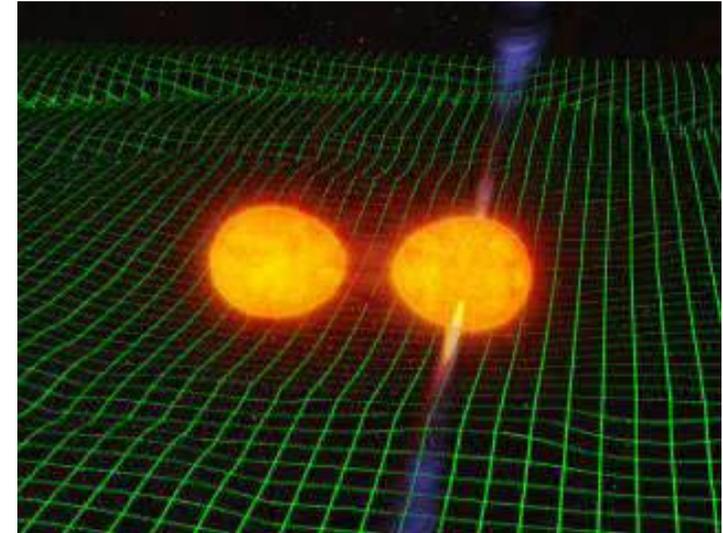
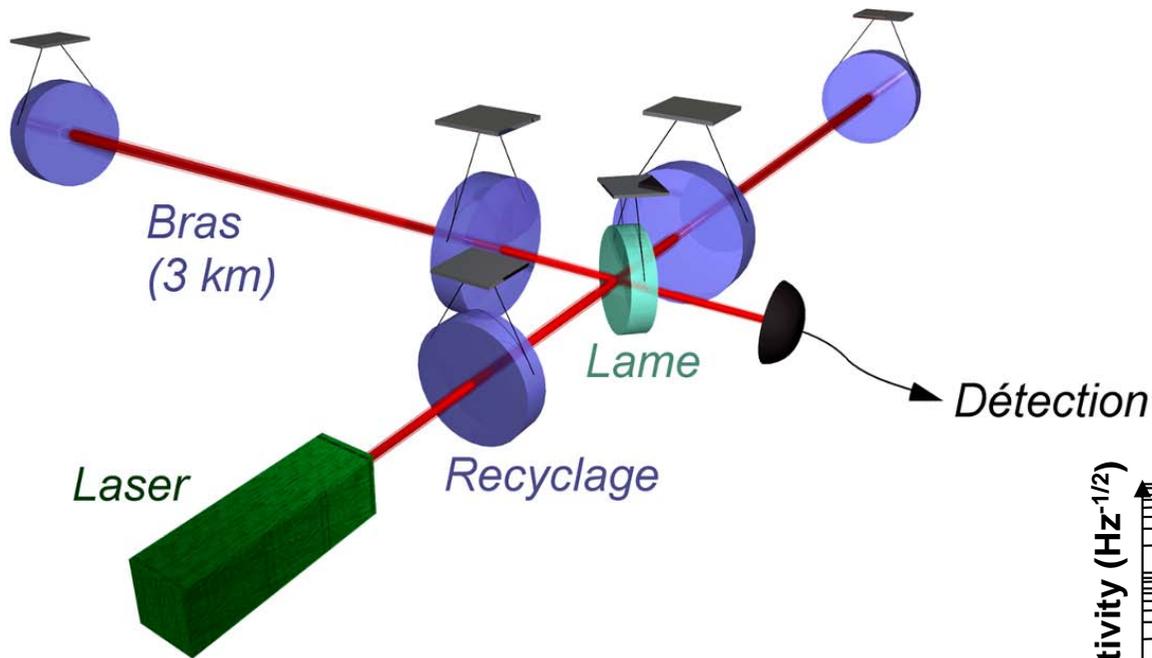


Ligo, Virgo ...



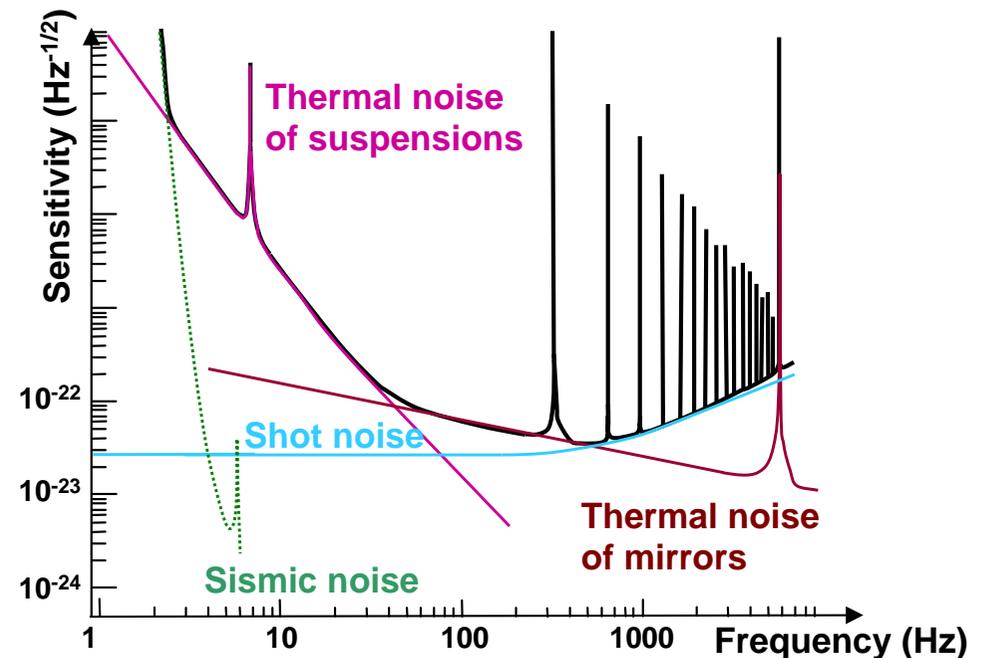
Détecter les ondes gravitationnelles

Détection d'évènements violents
(fin de vie d'un système binaire)



Sensibilité : $\Delta L \simeq 10^{-19} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$

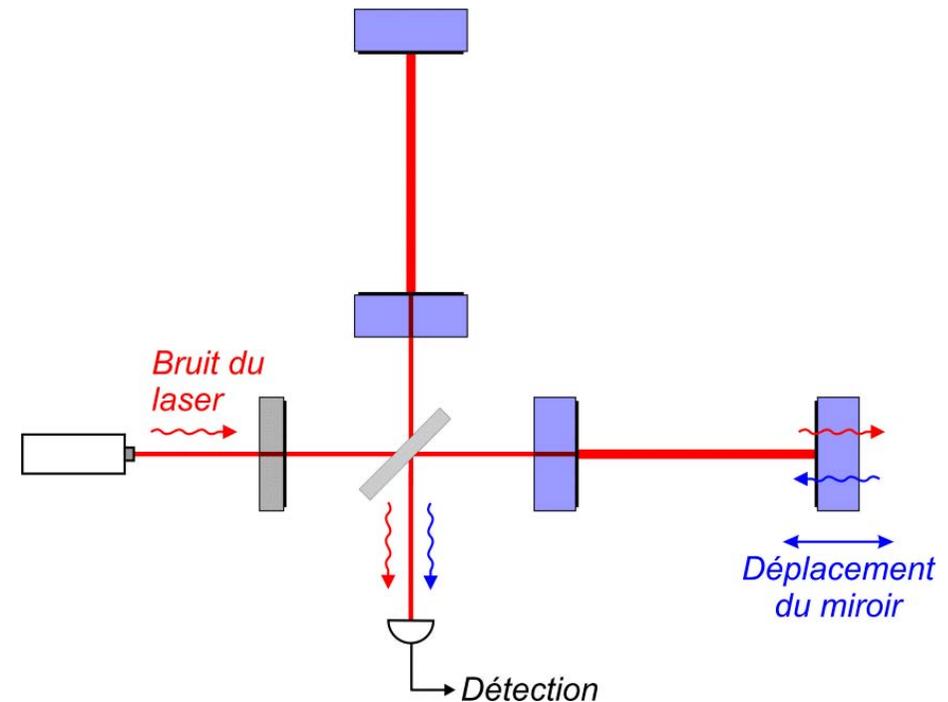
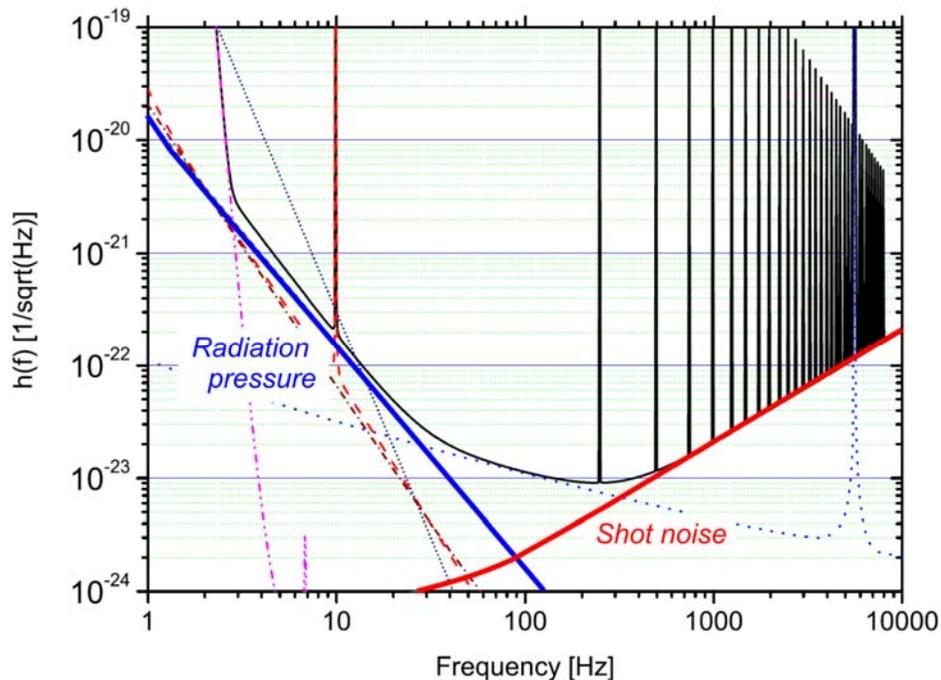
Limitée par le bruit thermique



Bruits quantiques dans les antennes gravitationnelles

La prochaine génération sera limitée par les bruits quantiques :

- Bruit du laser (shot noise)
- Déplacements induits par la pression de radiation



- ➔ Etude des limites quantiques
- ➔ Possibilités de dépasser ces limites
Etats comprimés, mesures QND, ...

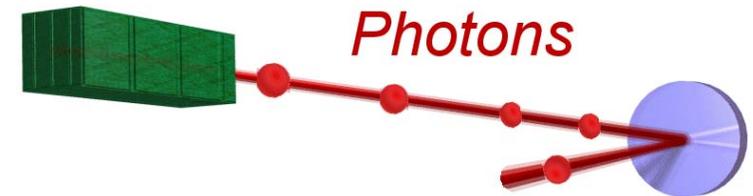
Pas de mise en évidence expérimentale du bruit quantique de pression de radiation !

Régime quantique du couplage optomécanique

Pression de radiation : $F_{\text{rad}}(t) = 2\hbar k \times I(t)$

$I(t)$: flux de photons

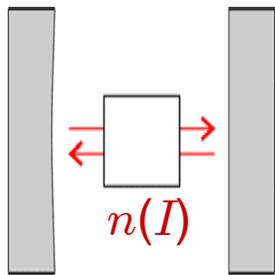
Ordres de grandeur : $\overline{F}_{\text{rad}} \sim 5 \text{ nN}$, $\delta F_{\text{rad}} \sim 1 \text{ aN}$ pour 1 W



→ Induit un déplacement parasite du miroir

*Principe général de la mesure en mécanique quantique :
la mesure perturbe la quantité mesurée !*

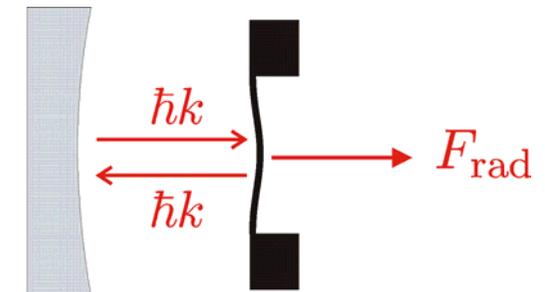
Une cavité avec un miroir mobile est équivalente
à une cavité avec un milieu non linéaire



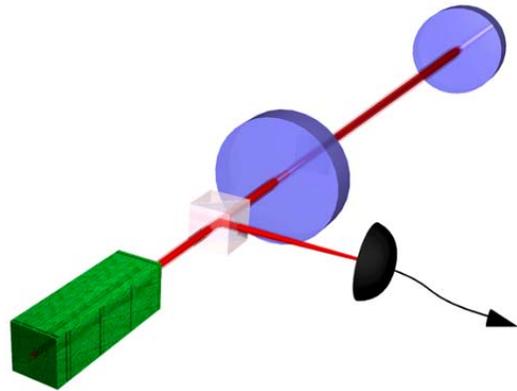
Longueur optique $n(I)L \Leftrightarrow$ Longueur physique $L(I)$

→ Réalisation d'expériences d'optique quantique

→ Intrication entre la lumière et le résonateur



Voir les effets de pression de radiation ?



Bruits dans le faisceau réfléchi :

$$\delta\varphi_{\text{out}} \simeq \delta\varphi_{\text{in}} + \frac{\mathcal{F}}{\lambda} (\delta x_T + \delta x_{\text{rad}})$$

Shot noise (bruit de phase incident) → $\delta\varphi_{\text{in}}$

Bruit thermique → δx_T

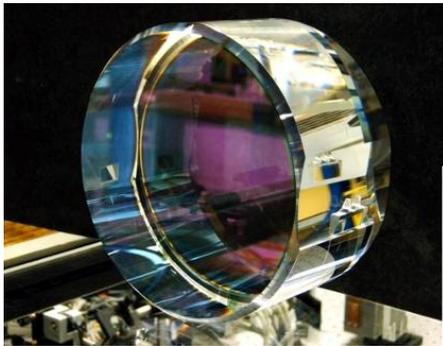
Pression de radiation → δx_{rad}

Un challenge expérimental :

$$\left(\frac{\delta x_{\text{rad}}}{\delta x_T} \right)^2 \simeq \left(\frac{\mathcal{F}}{300\,000} \right) \left(\frac{P}{100\text{ W}} \right) \left(\frac{1\text{ MHz}}{\Omega_m/2\pi} \right) \left(\frac{1\text{ mg}}{M} \right) \left(\frac{Q}{10^6} \right) \left(\frac{1\text{ K}}{T} \right)$$

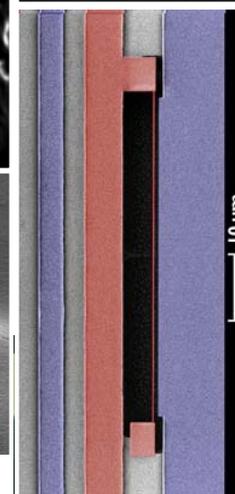
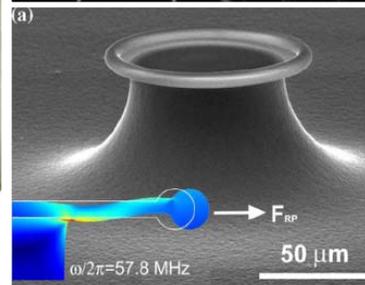
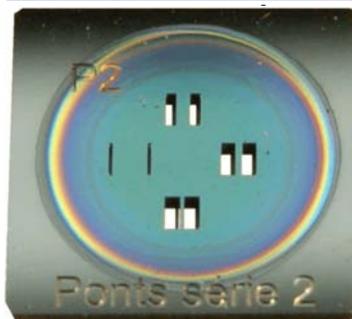
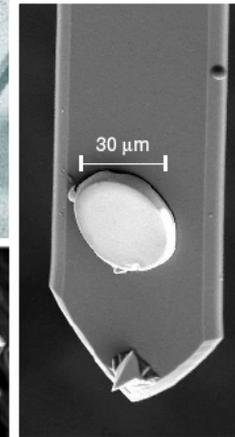
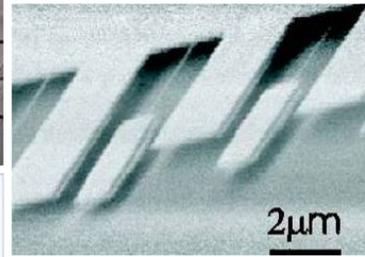
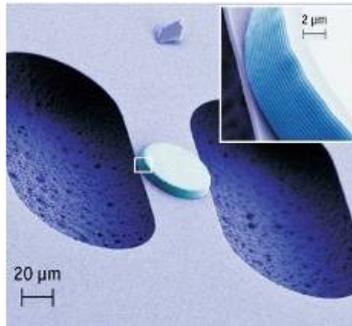
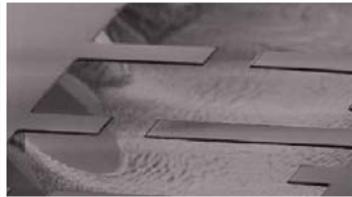
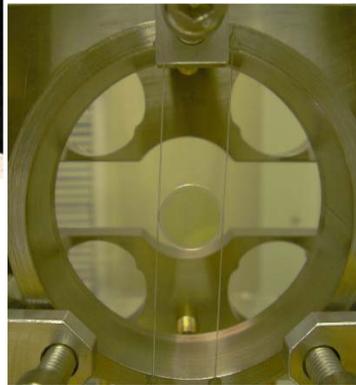
- Grande sensibilité (finesse \mathcal{F} , puissance intracavité P)
- Réponse mécanique (fréquence Ω_m , masse M , facteur de qualité Q)
- Basse température T

Des systèmes optomécaniques de grande finesse



Antennes gravitationnelles
Grande sensibilité aux déplacements

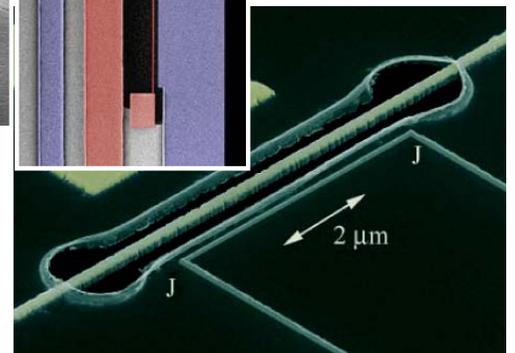
Masse ~ kg
Longueur ~ km
Fréquence ~ Hz



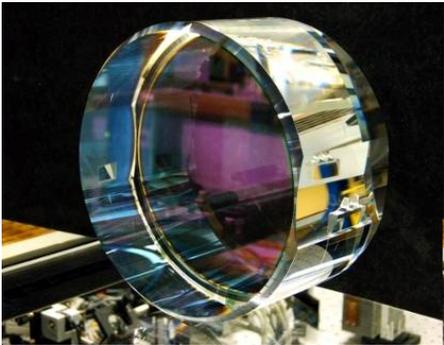
Masse ~ pg
Longueur ~ nm
Fréquence ~ GHz

Même physique (quantique) :

- Action en retour
(limites quantiques dans les mesures)
- Expériences d'optique quantique
(squeezing, corrélations, mesure QND)
- Systèmes mécaniques en régime quantique
(état fondamental, intrication, décohérence)



Des systèmes optomécaniques de grande finesse



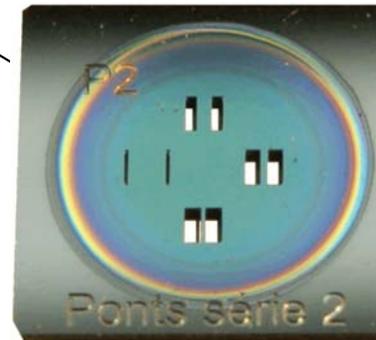
Masse ~ kg
Longueur ~ km
Fréquence ~ Hz

Modes de vibration interne
de miroirs de taille centimétrique



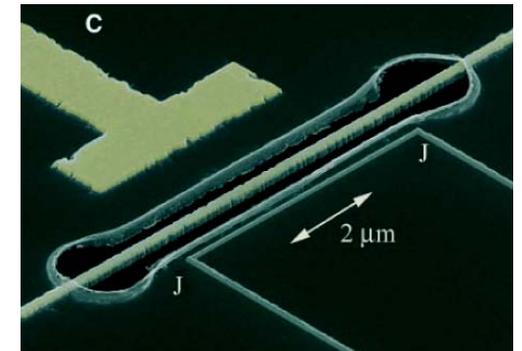
Masse ~ μg à g
Longueur ~ mm
Fréquence ~ MHz

collaboration
LMA LABORATOIRE
MATÉRIAUX
AVANCÉS

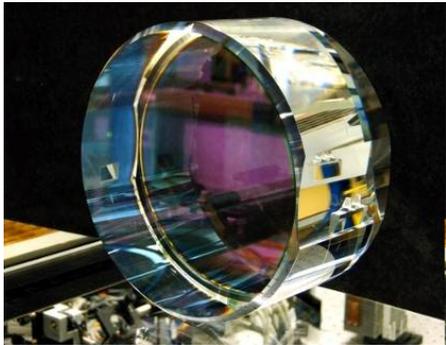


Micro-miroirs
(MEMS)

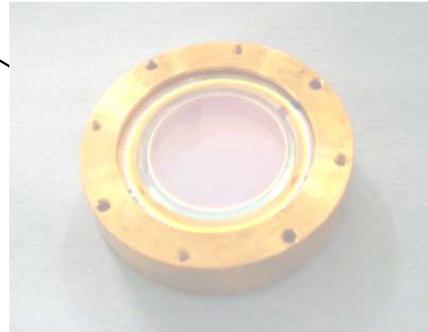
Masse ~ pg
Longueur ~ nm
Fréquence ~ GHz



Des systèmes optomécaniques de grande finesse

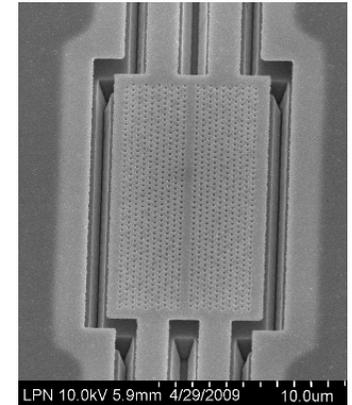


Masse ~ kg
Longueur ~ km
Fréquence ~ Hz

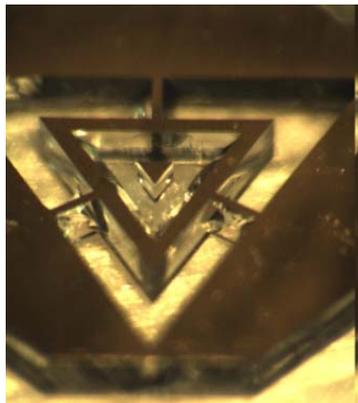


Membranes à cristaux
photoniques

Faible masse

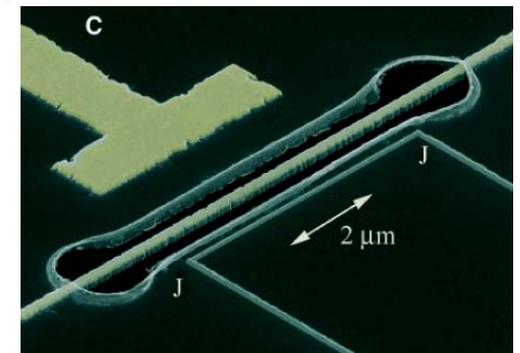


Masse ~ pg
Longueur ~ nm
Fréquence ~ GHz



Modes de compression
de micro-piliers

Grand facteur de qualité mécanique

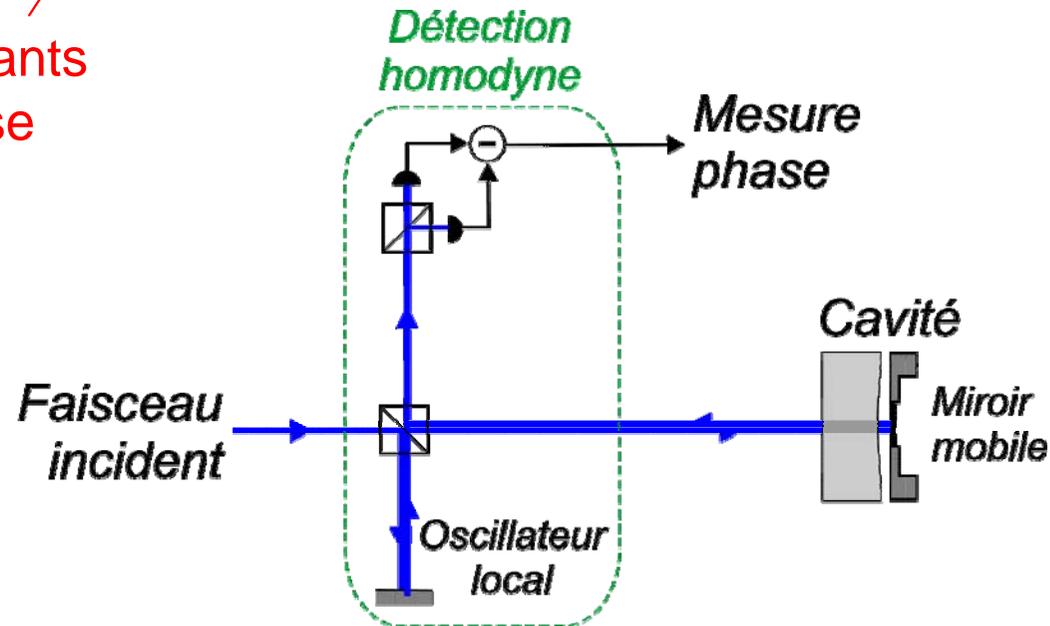


Voir les effets de pression de radiation...

Les fluctuations d'intensité du faisceau font bouger le miroir

$$\delta\varphi_{\text{out}} \simeq \delta\varphi_{\text{in}} + \frac{\mathcal{F}}{\lambda} (\delta x_T + \delta x_{\text{rad}})$$

Les déplacements résultants sont mesurés sur la phase du faisceau réfléchi

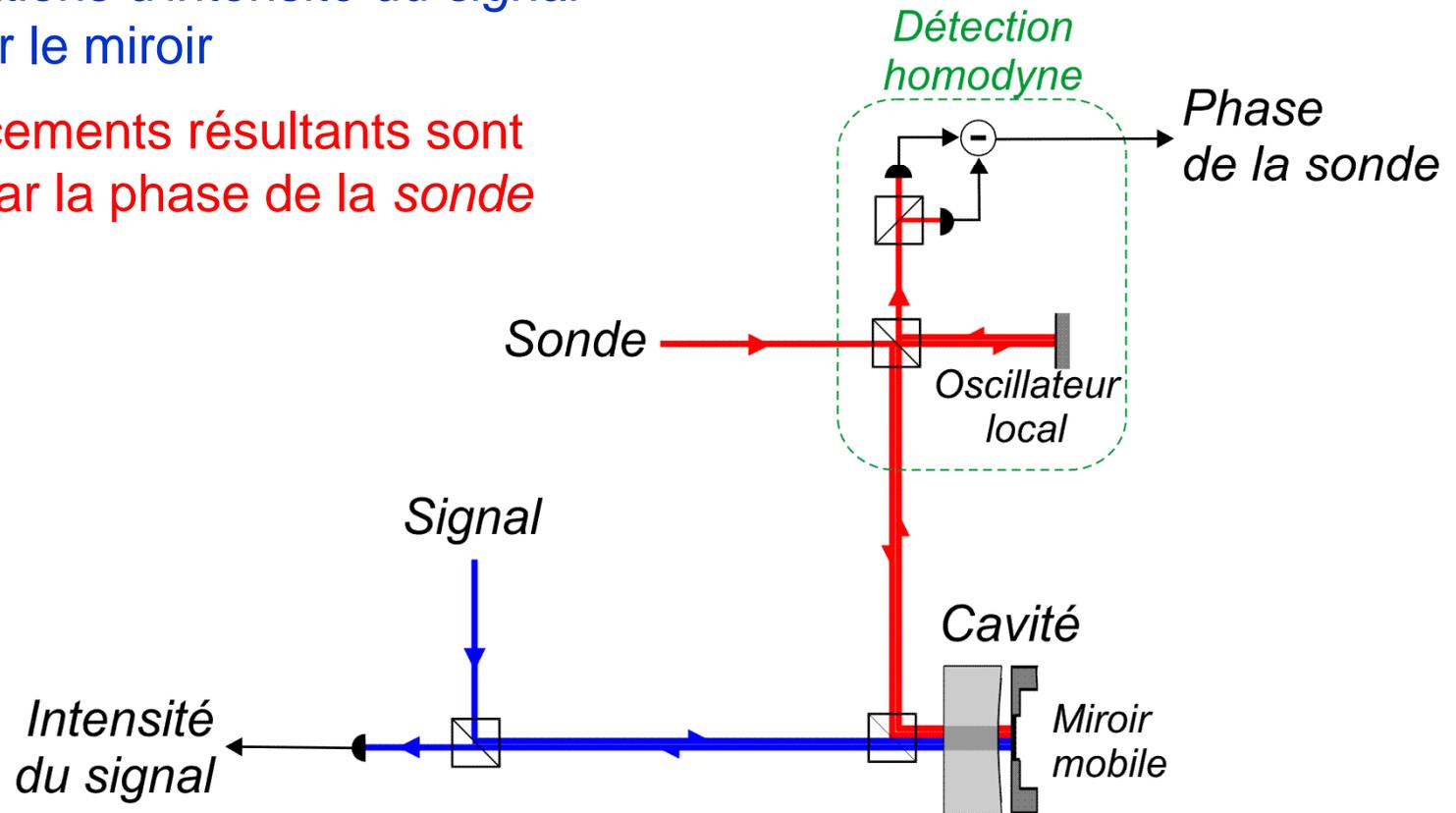


Comment corréler les déplacements observés à la pression de radiation ?

Voir les effets de pression de radiation...

2 faisceaux envoyés dans la cavité :

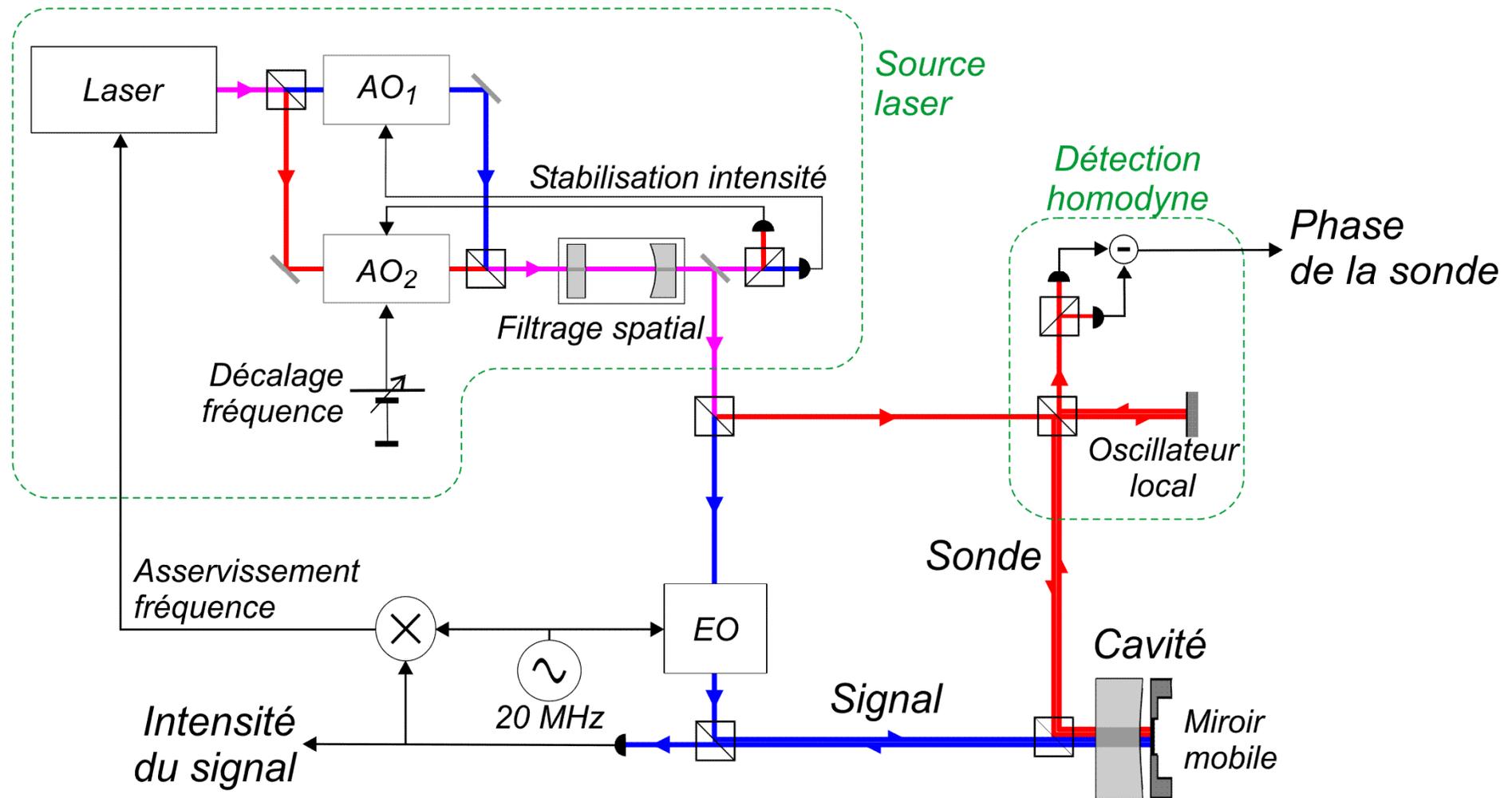
- Les fluctuations d'intensité du *signal* font bouger le miroir
- Les déplacements résultants sont mesurés par la phase de la *sonde*



Corrélations optomécaniques intensité – phase

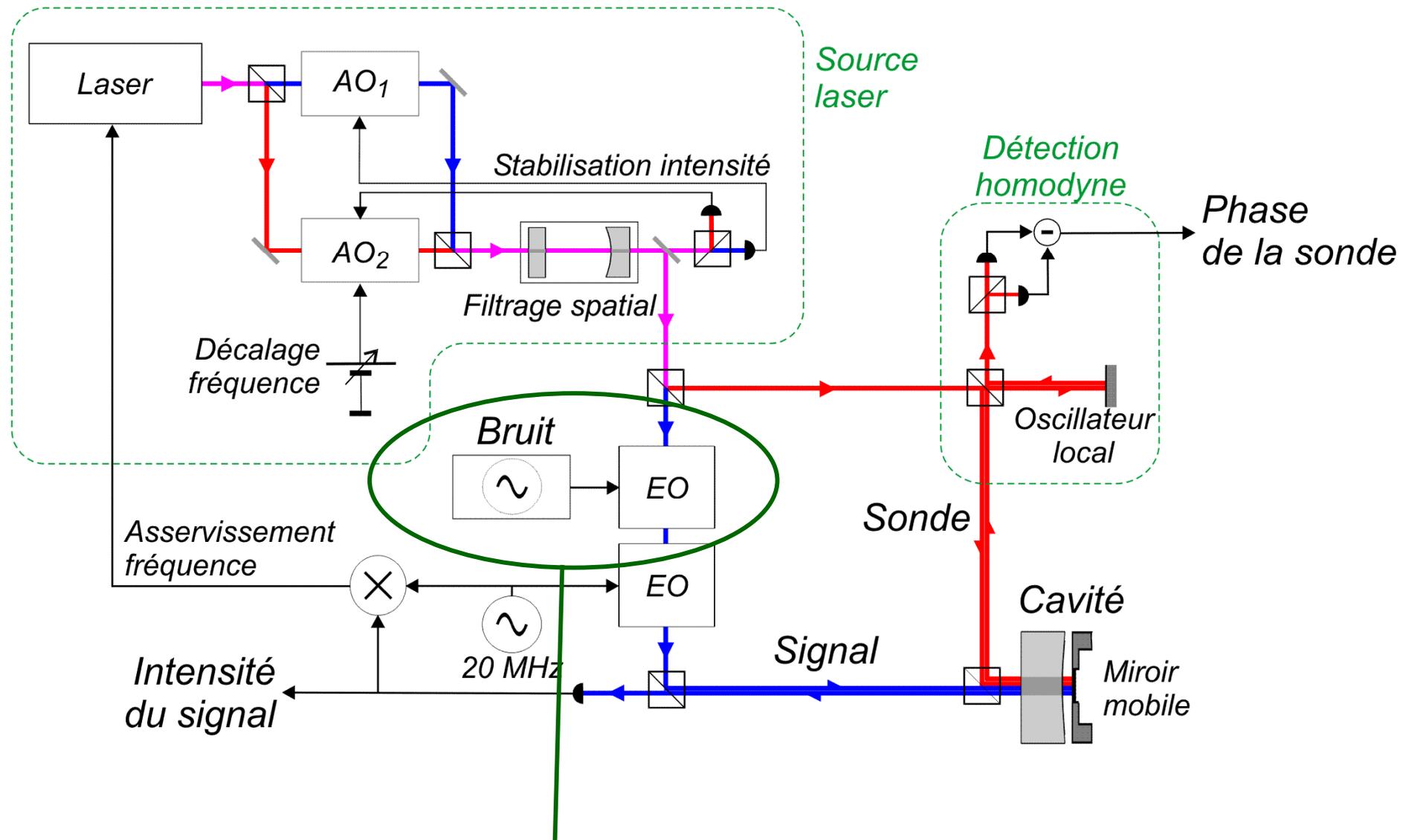
→ *Mesure Quantique Non Destructive (QND) de l'intensité du signal*

Montage expérimental



Source laser stabilisée,
asservie sur la résonance de la cavité

Montage expérimental

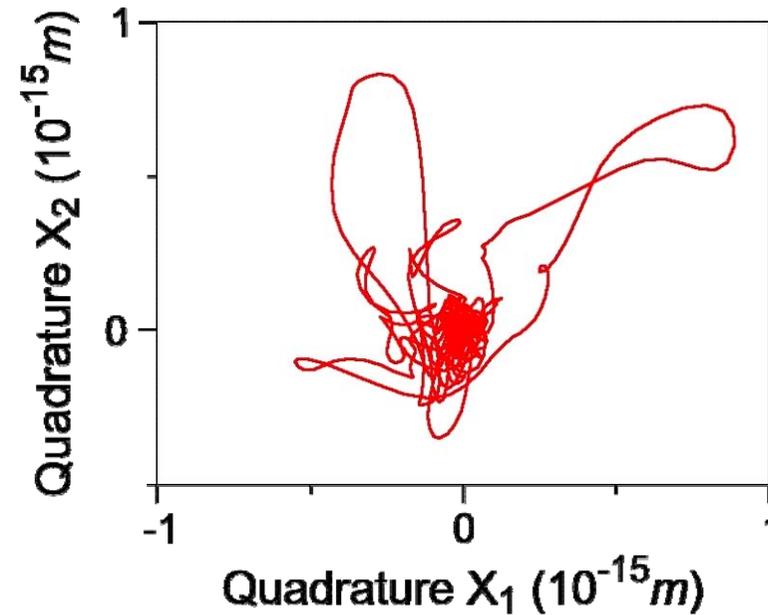
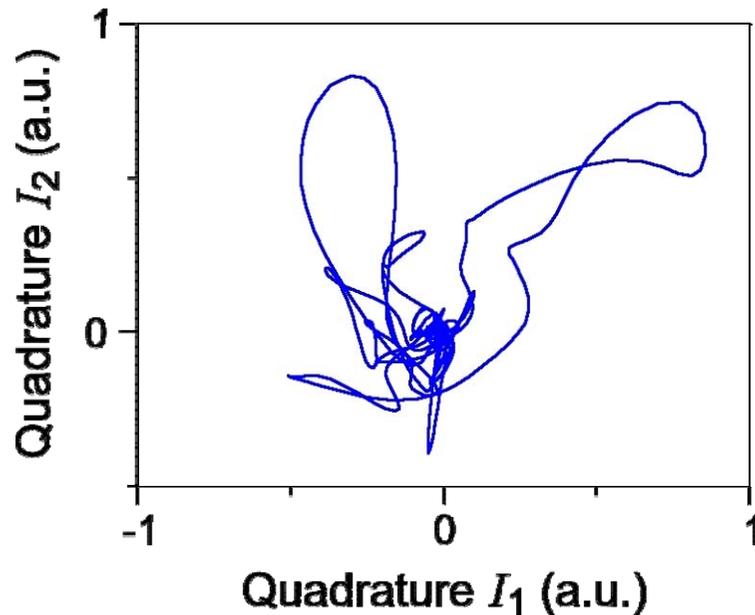


Un bruit classique simule le bruit quantique, avec $\delta x_{\text{rad}} > \delta x_T$

Résultats : bruits dans l'espace des phases

Bruit d'intensité signal : $\delta I_{\text{out}}(t) = I_1(t) \cos(\Omega_0 t) + I_2(t) \sin(\Omega_0 t)$

Bruit de phase sonde : $\delta \varphi_{\text{out}}(t) = X_1(t) \cos(\Omega_0 t) + X_2(t) \sin(\Omega_0 t)$



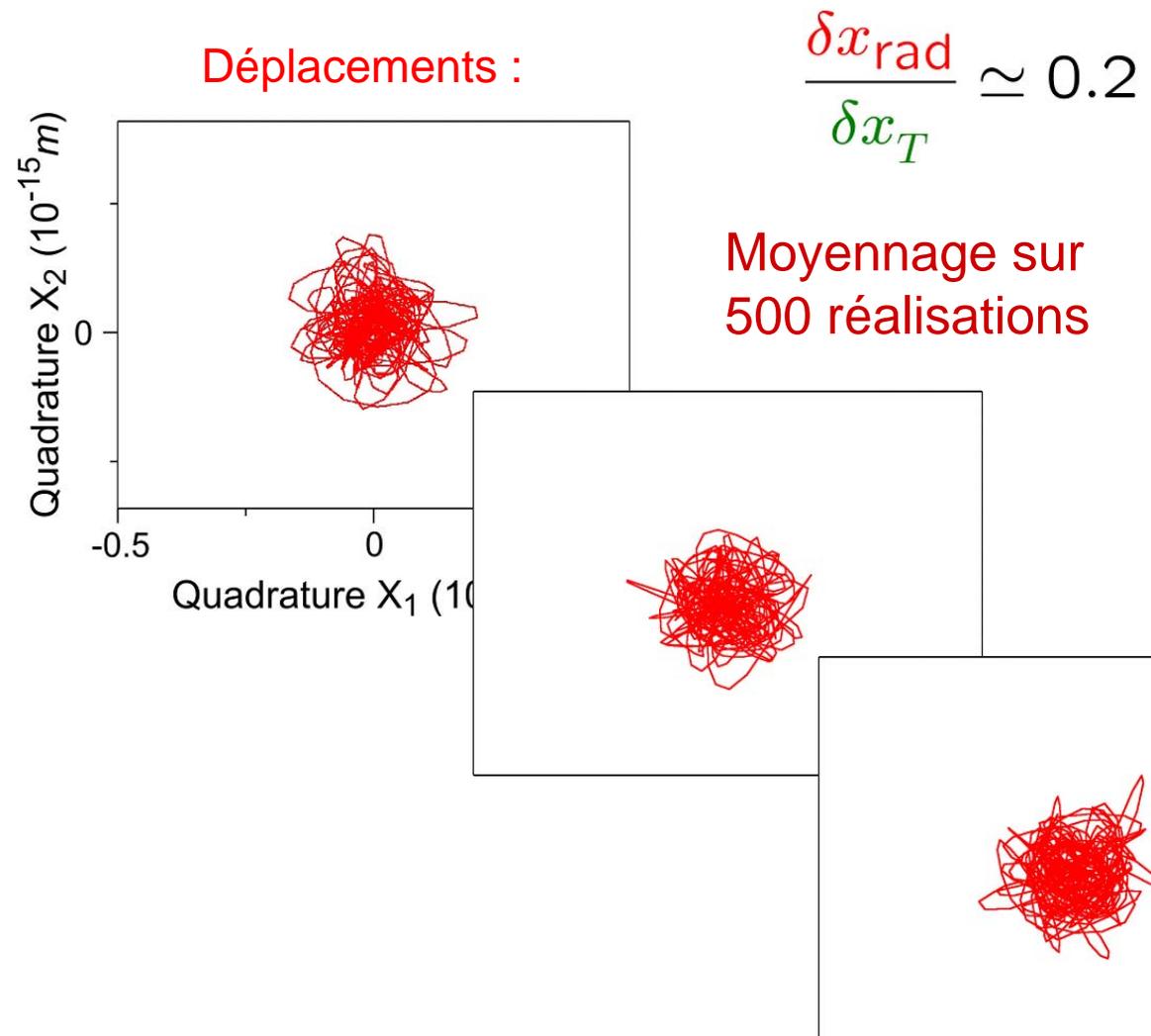
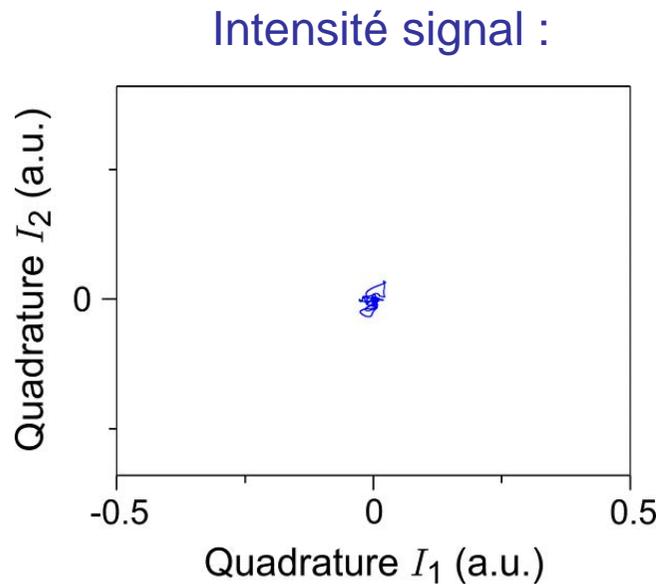
→ Fortes corrélations entre les 2 trajectoires :

$$\frac{\delta x_{\text{rad}}}{\delta x_T} \simeq 5 \rightarrow C_{I,\varphi} = \frac{|\langle \delta I_{\text{out}} \delta \varphi_{\text{out}}^* \rangle|^2}{\Delta I_{\text{out}}^2 \Delta \varphi_{\text{out}}^2} = 0.96$$

Voir les corrélations quantiques ?

Pour le bruit quantique de pression de radiation : $\delta x_{\text{rad}} < \delta x_T$

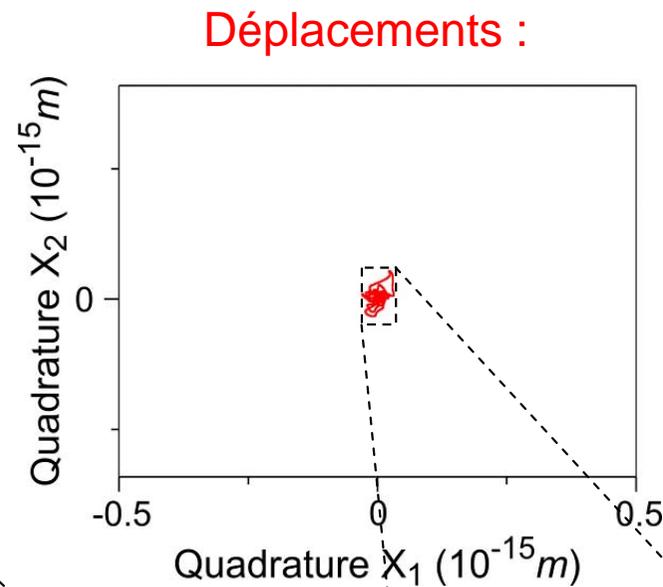
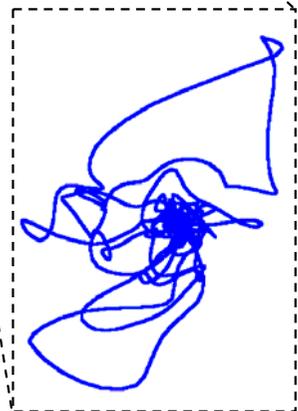
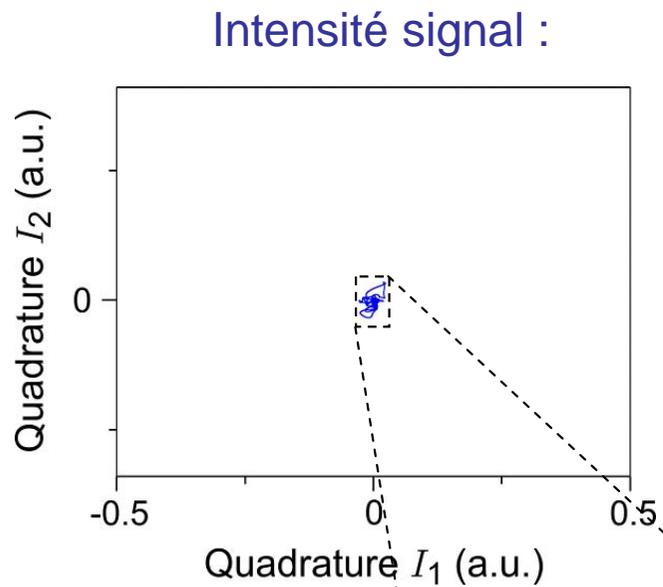
→ L'effet est masqué par le bruit thermique



Voir les corrélations quantiques ?

Pour le bruit quantique de pression de radiation : $\delta x_{\text{rad}} < \delta x_T$

→ L'effet est masqué par le bruit thermique



$$\frac{\delta x_{\text{rad}}}{\delta x_T} \simeq 0.2$$

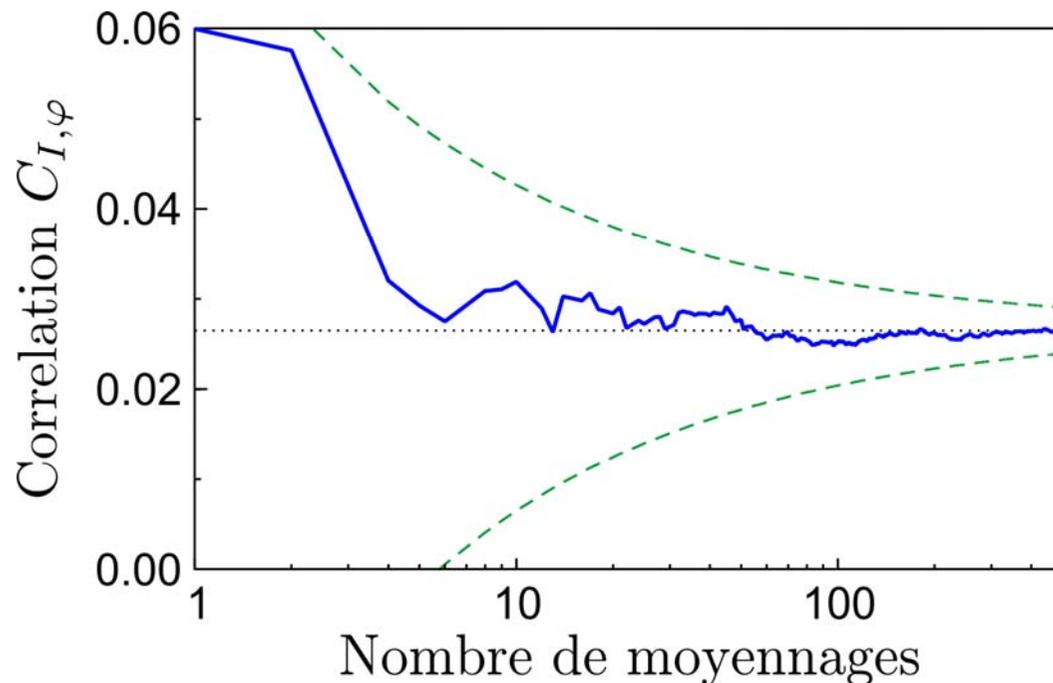
Moyennage sur
500 réalisations

Voir les corrélations quantiques ?

Pour le bruit quantique de pression de radiation : $\delta x_{\text{rad}} < \delta x_T$

→ Un moyennage temporel permet de retrouver les corrélations :

$$\langle \delta I_{\text{out}} \delta \varphi_{\text{out}} \rangle \simeq \frac{\mathcal{F}}{\lambda} \left(\underbrace{\langle \delta I_{\text{out}} \delta x_T \rangle}_{\rightarrow 0} + \underbrace{\langle \delta I_{\text{out}} \delta x_{\text{rad}} \rangle}_{\text{Corrélations quantiques}} \right)$$



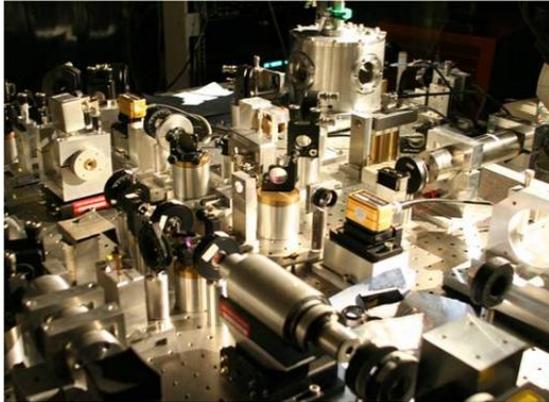
$$C_{I,\varphi} \simeq 0.03 \text{ pour } \frac{\delta x_{\text{rad}}}{\delta x_T} \simeq 0.2$$

Pour le bruit quantique :

$$\frac{\delta x_{\text{rad}}}{\delta x_T} \simeq 0.1 \text{ à } 1 \text{ K}$$

→ Vers l'observation des corrélations quantiques

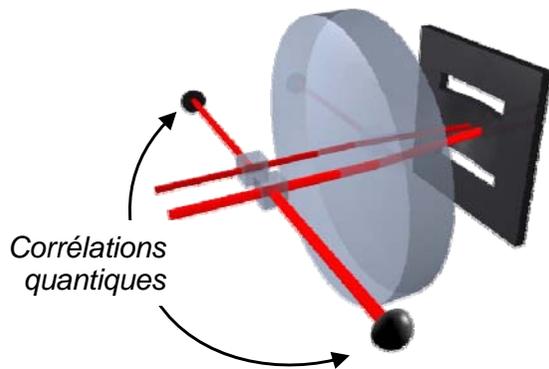
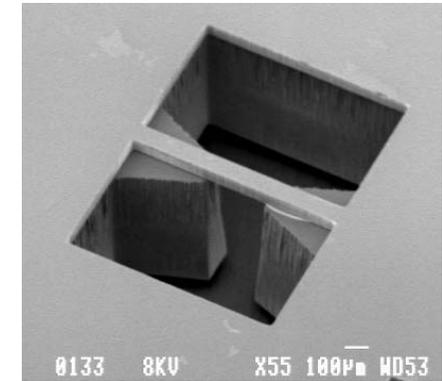
Vers l'optomécanique quantique...



1 – Mesure optique ultra-sensible des déplacements d'un résonateur mécanique

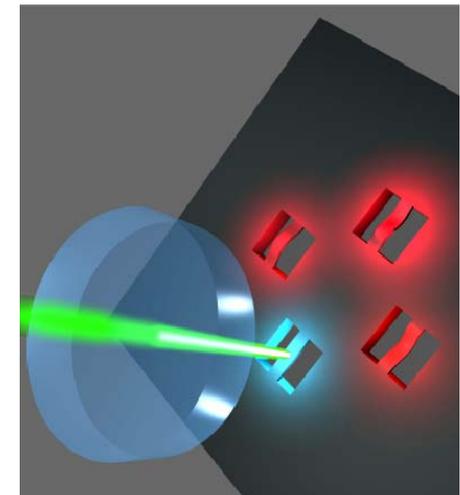
→ *Voir l'influence de la pression de radiation*

2 – Couplage optomécanique entre la lumière et un système mécanique



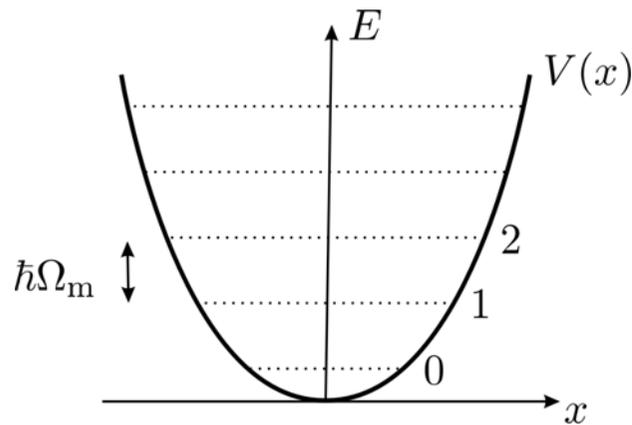
→ *Action en retour dans les mesures, contrôler le bruit de la lumière*

→ *Agir au niveau quantique sur un système mécanique macroscopique*



Agir au niveau quantique sur un micro-résonateur ?

Utiliser le couplage optomécanique pour atteindre et observer l'état quantique fondamental d'un résonateur mécanique macroscopique

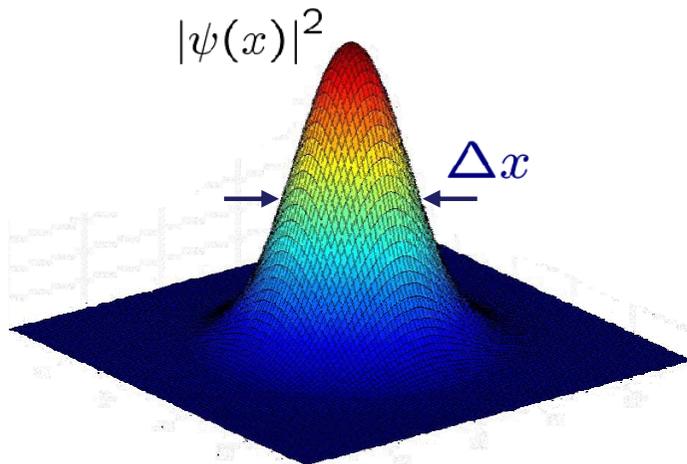


- Observer les fluctuations quantiques résiduelles :

$$M\Omega_m^2\Delta x^2 = \frac{\hbar\Omega_m}{2}$$

$$\rightarrow \Delta x \simeq 10^{-17} \text{ m}$$

$$(M \simeq 100 \mu\text{g}, \Omega_m/2\pi \simeq 1 \text{ MHz})$$



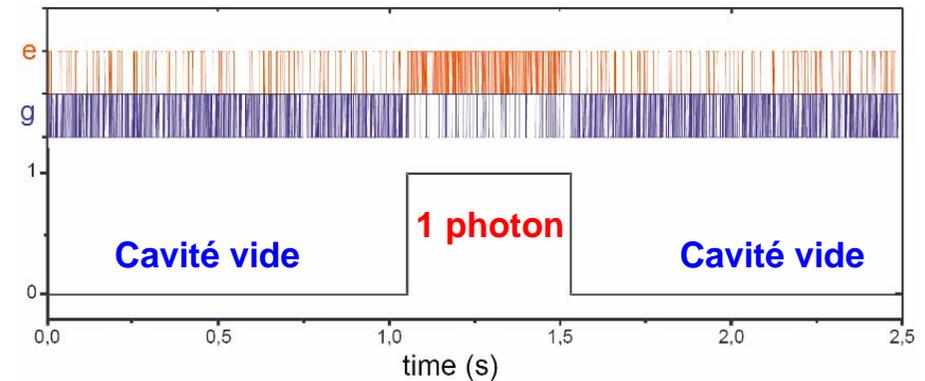
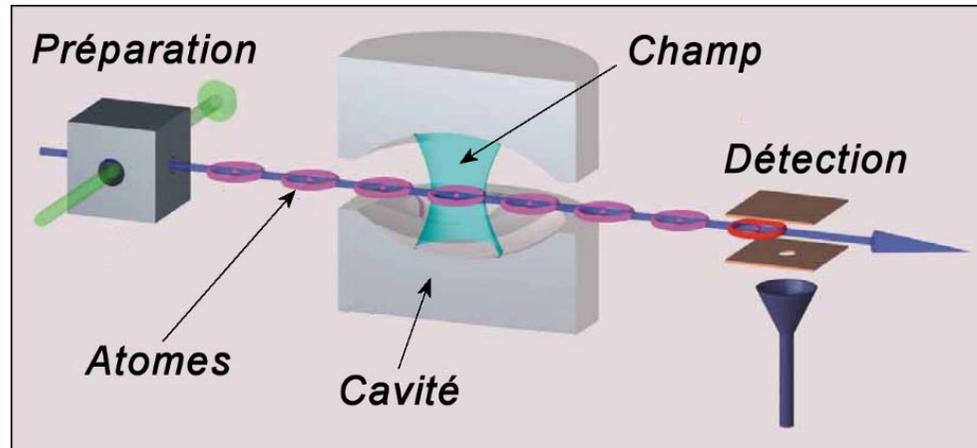
- Atteindre le régime quantique :

$$k_B T \leq \hbar\Omega_m \quad \begin{array}{l} 1 \text{ GHz} \leftrightarrow 50 \text{ mK} \\ 1 \text{ MHz} \leftrightarrow 50 \mu\text{K} \end{array}$$

\rightarrow Cryogénie et refroidissement laser

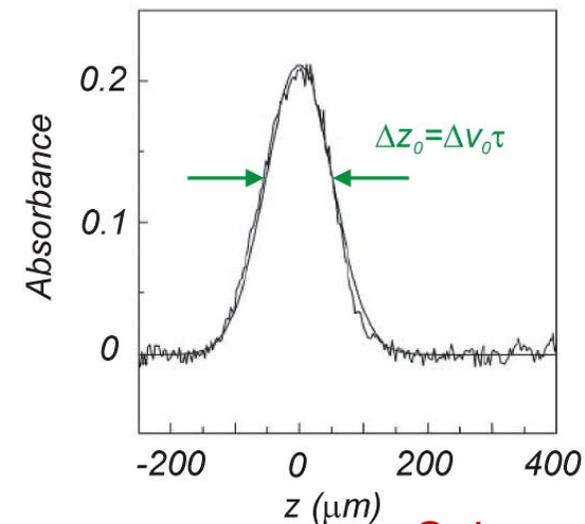
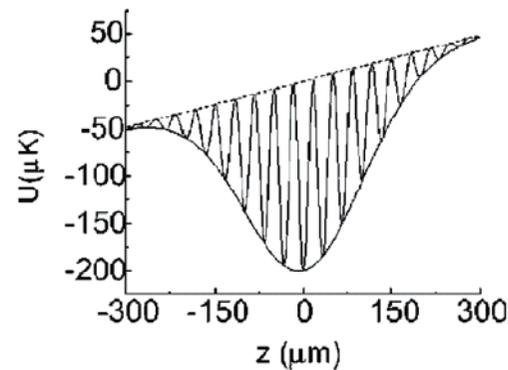
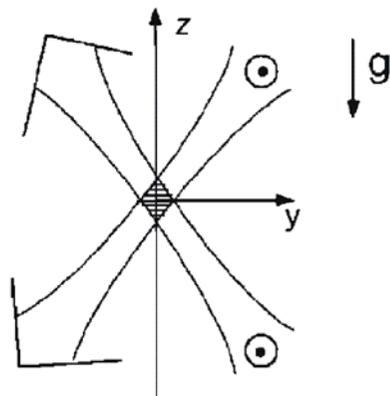
Exemples d'observation du régime quantique

Quantification du champ dans une cavité micro-onde (50 GHz, < 1 K)



Haroche et al., 2007

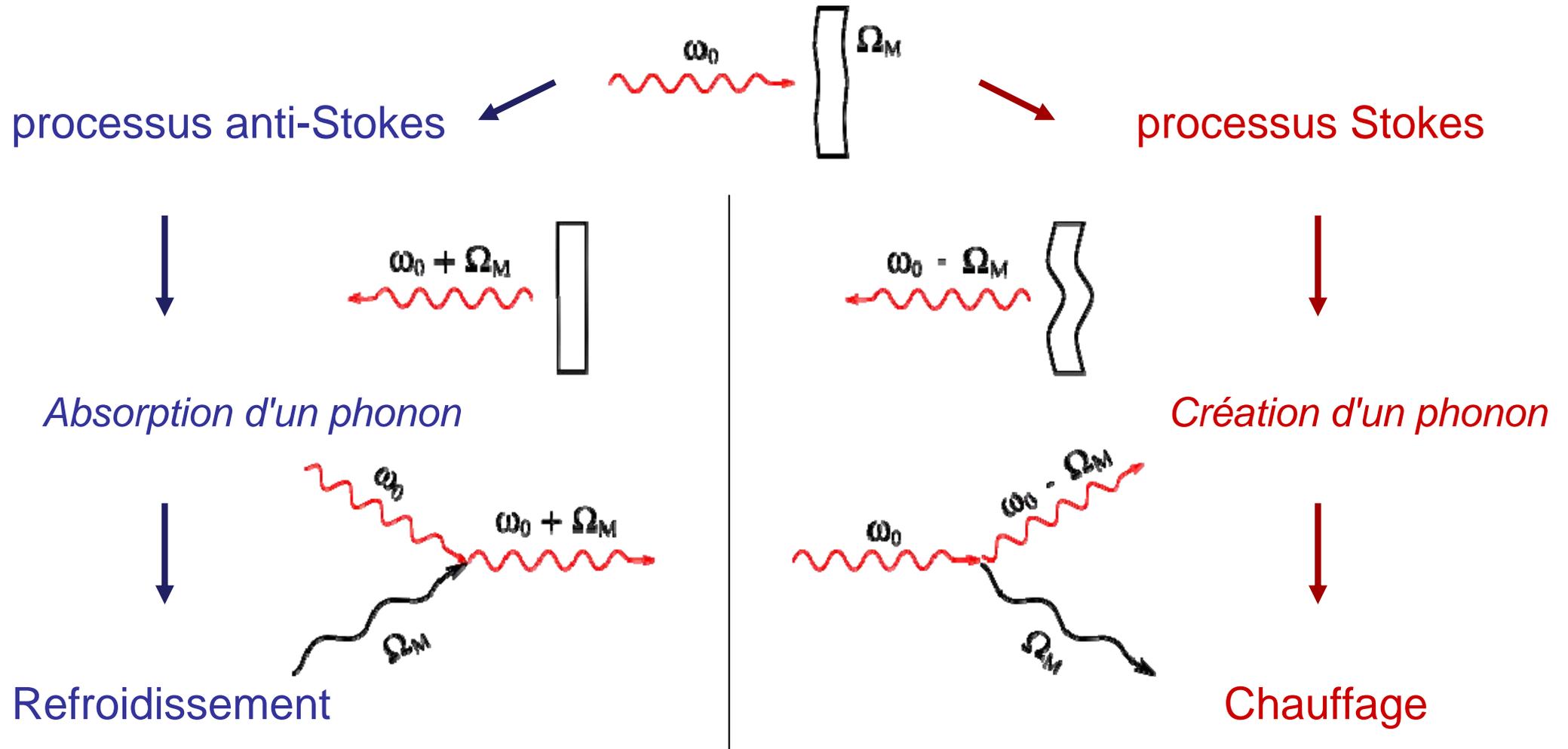
Atomes de Césium dans un micro-piège dipolaire (80 kHz, 4 μ K)



Salomon et al., 1998

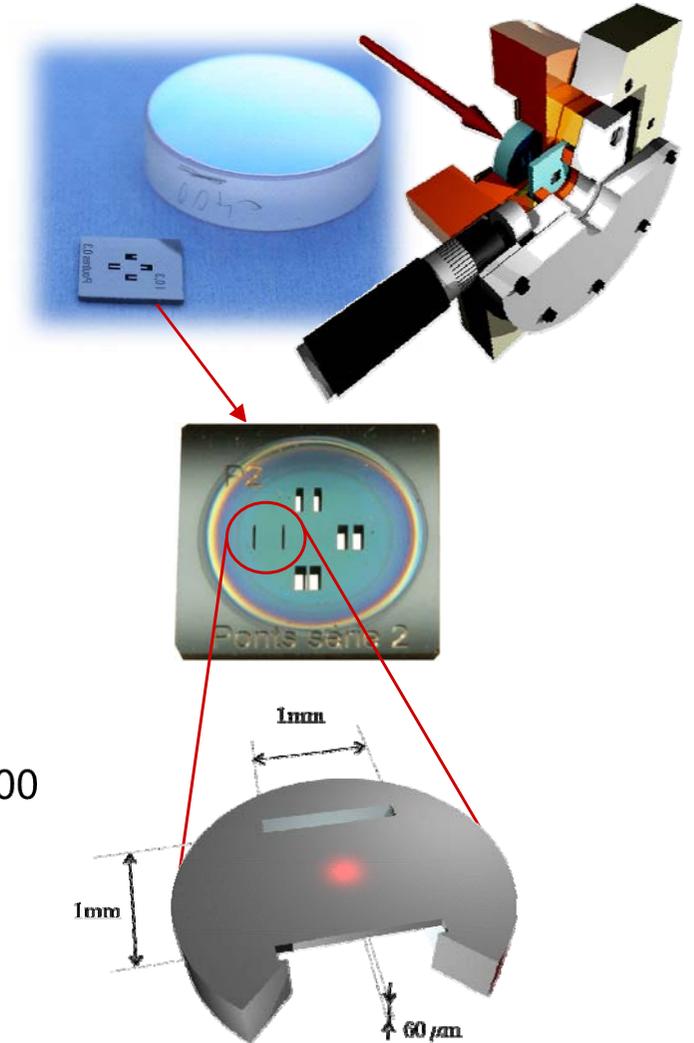
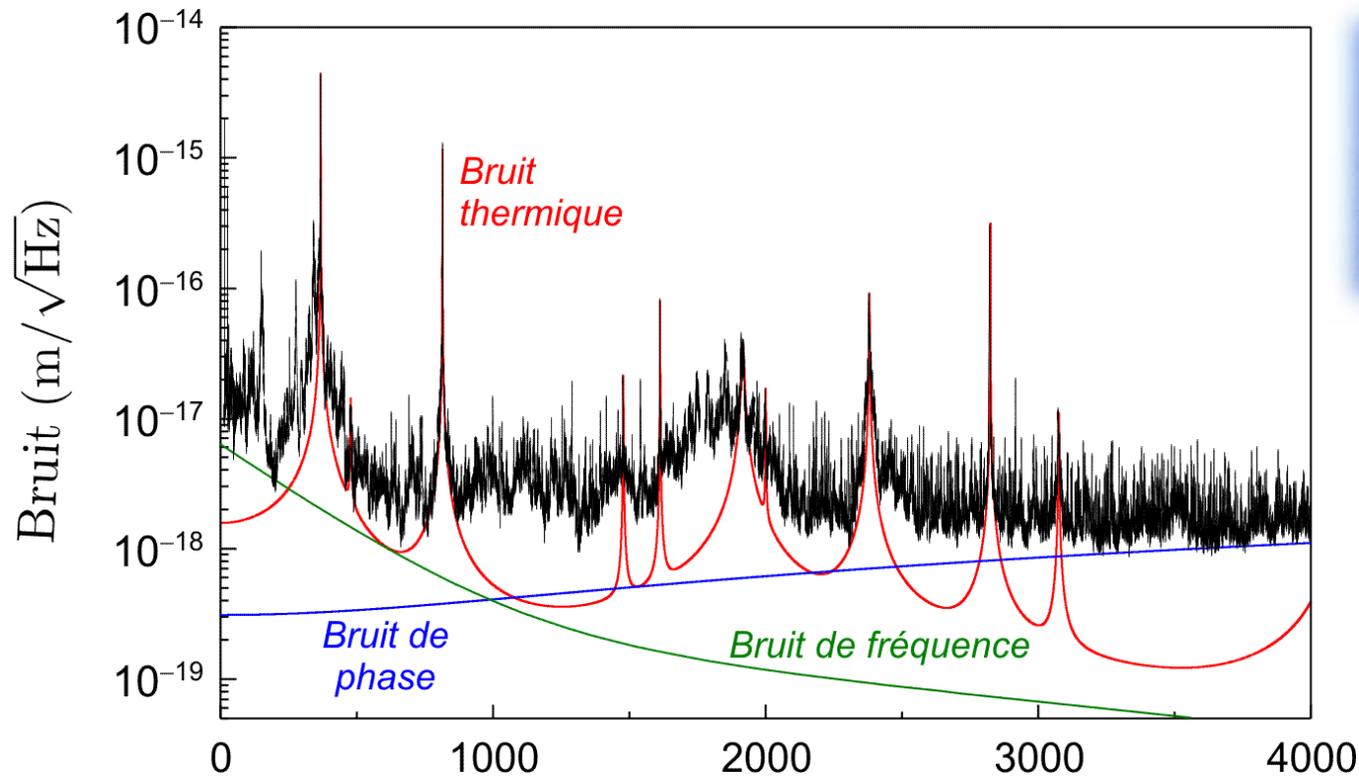
Processus élémentaires du refroidissement laser

Transfert d'énergie entre les modes optique et mécanique par pression de radiation :



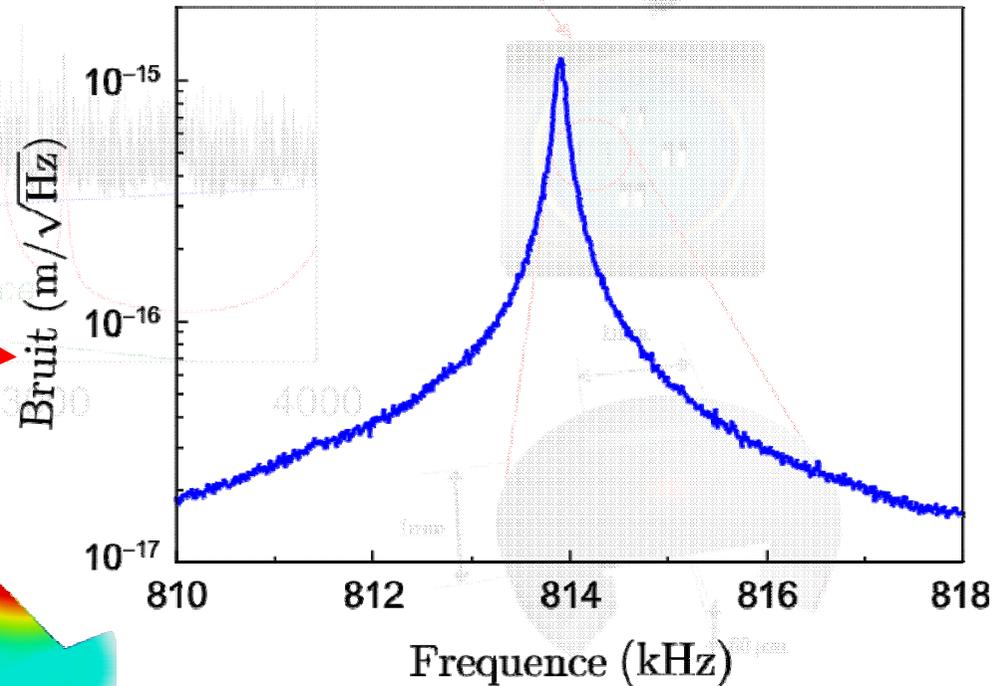
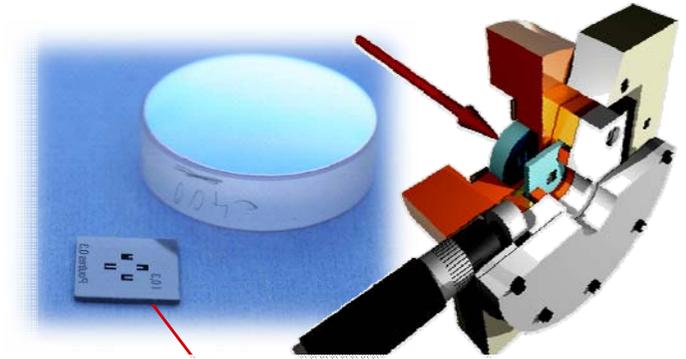
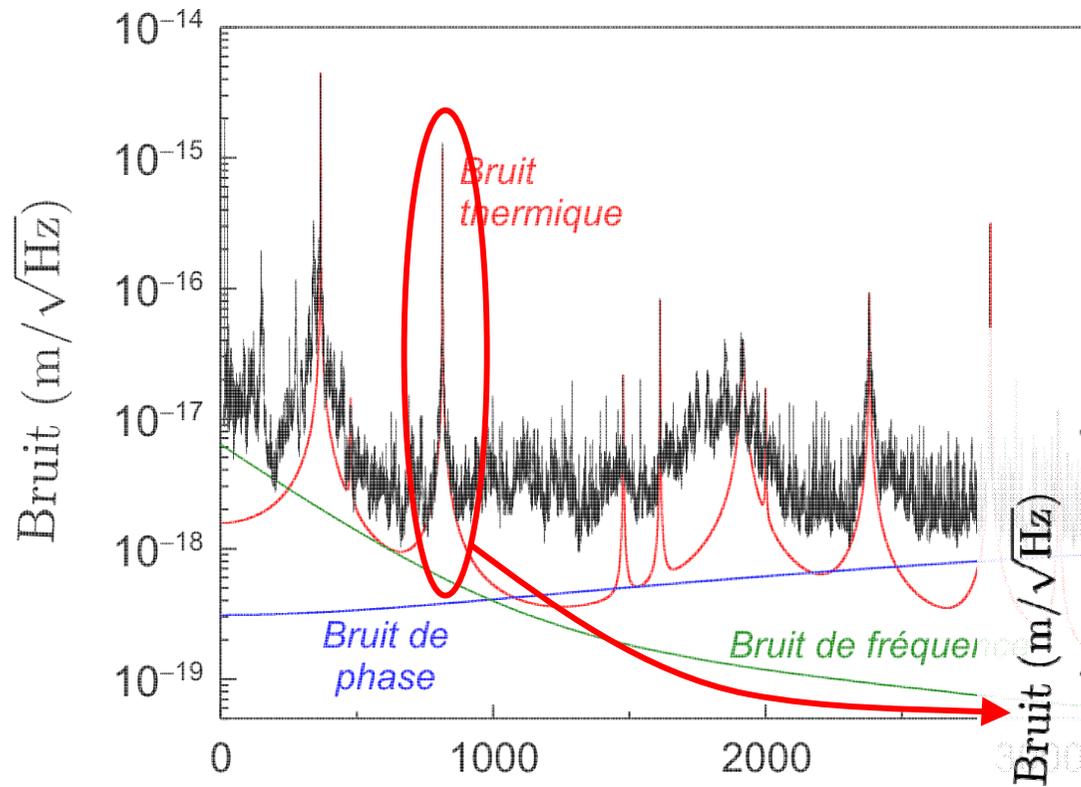
Refroidissement laser d'un micro-miroir

A température ambiante, observation du bruit thermique



Refroidissement laser d'un micro-miroir

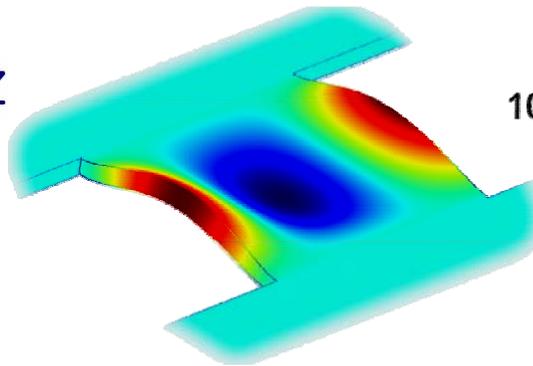
A température ambiante, observation du bruit thermique



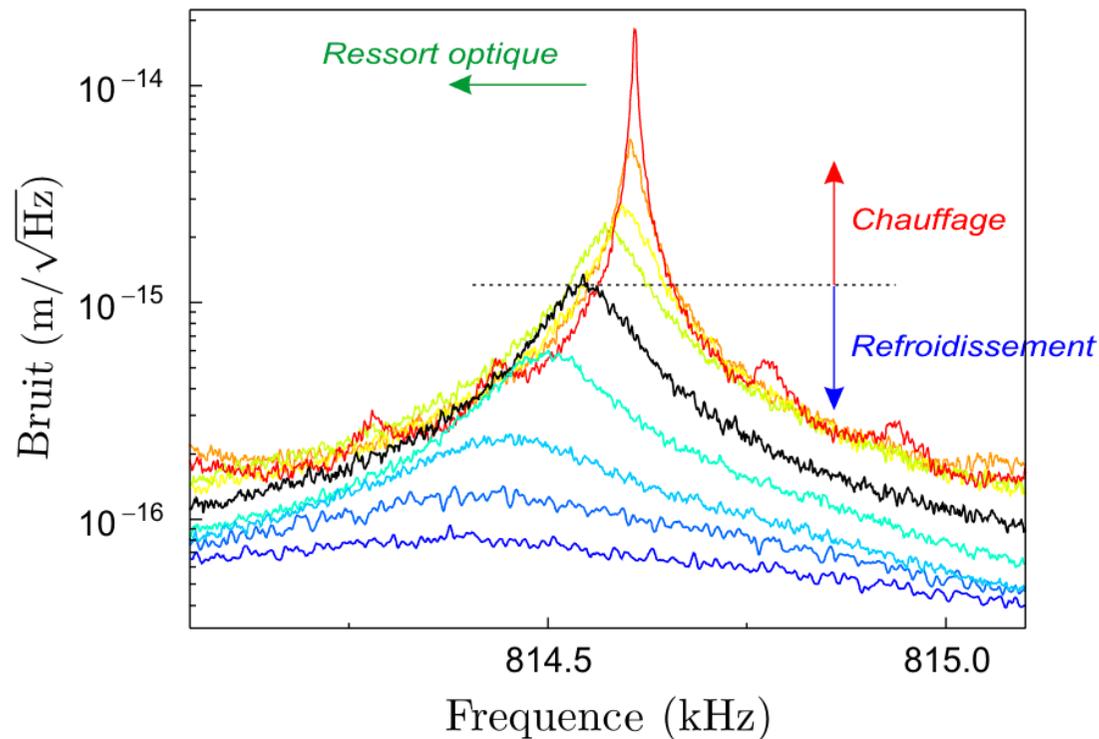
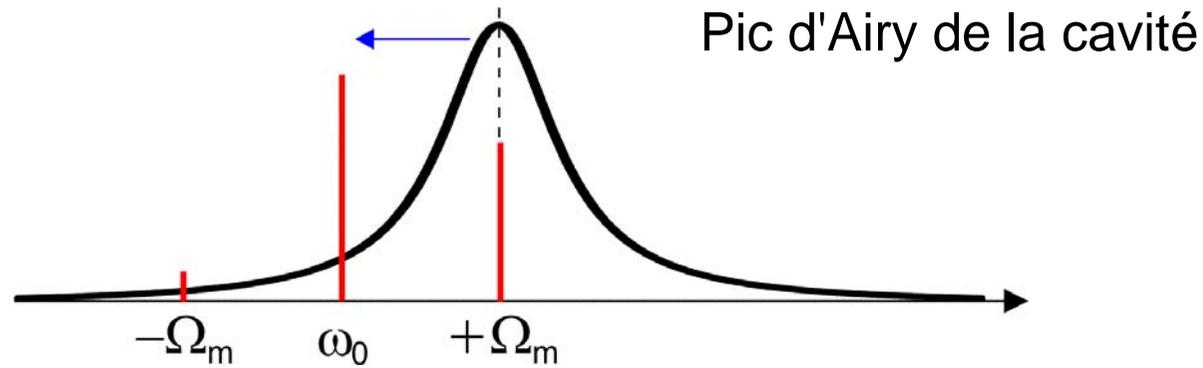
$$\Omega_m/2\pi \simeq 814 \text{ kHz}$$

$$M \simeq 190 \mu\text{g}$$

$$Q \simeq 8000$$



Refroidissement laser d'un micro-miroir



Spectre de bruit thermique

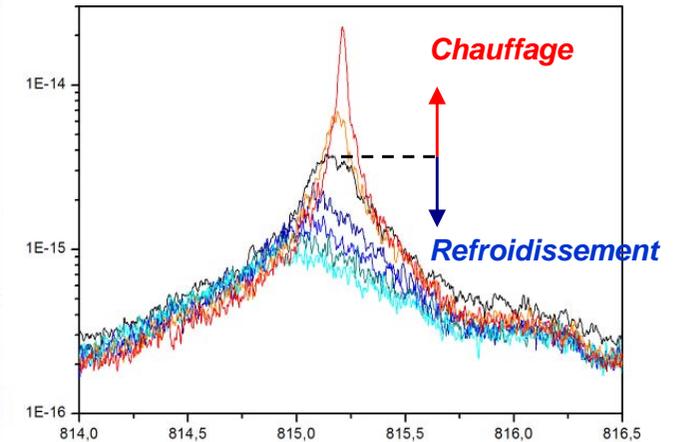
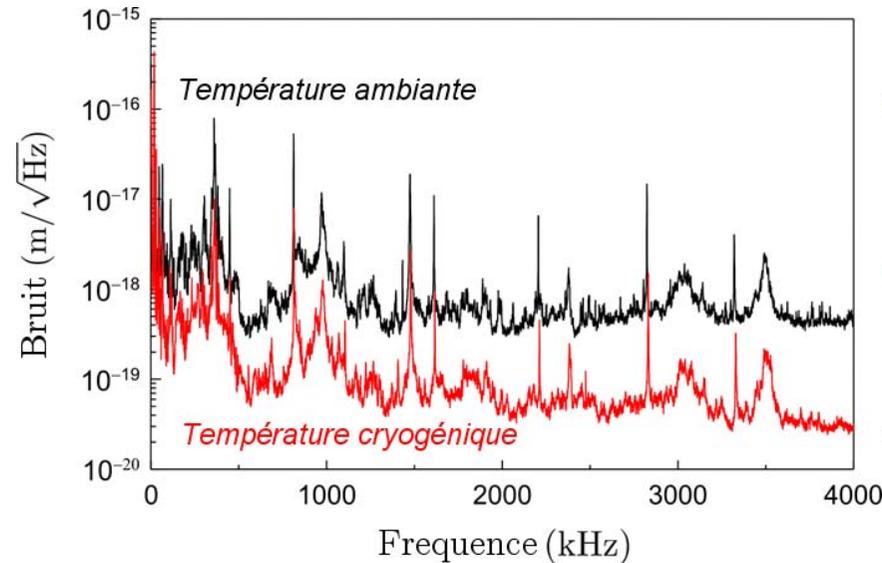
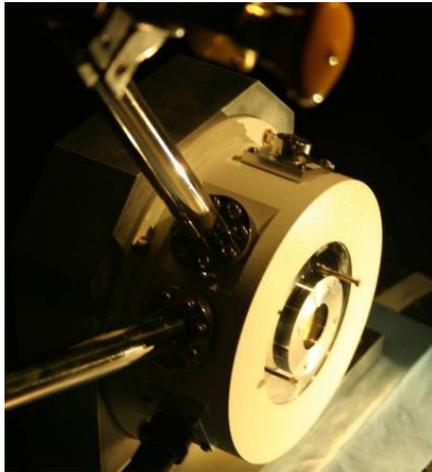
Désaccord négatif :
Favorise le processus anti-Stokes

Désaccord positif :
Favorise le processus Stokes

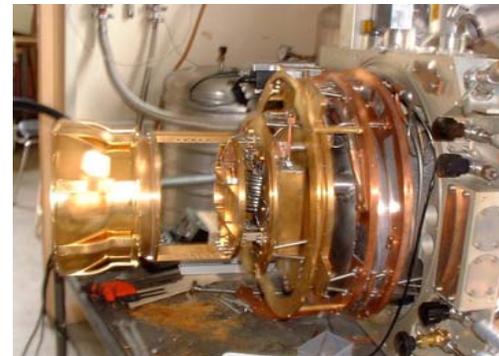
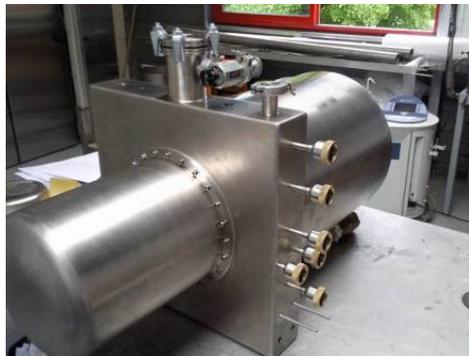
Température comprise entre 10 K et 2000 K

Refroidissement laser à basse température

Cavité de grande finesse dans un cryostat commercial 4 K

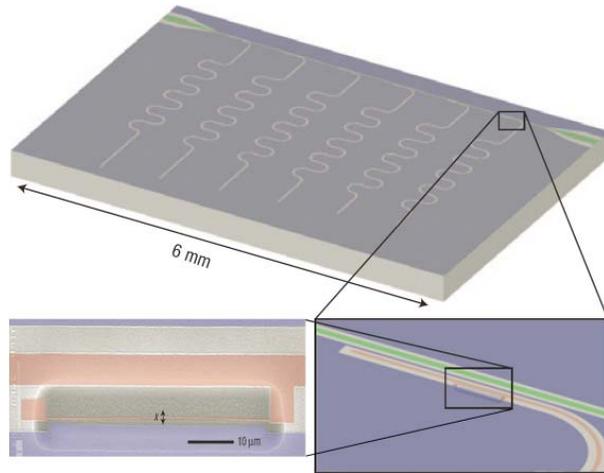


- ➔ Conception d'un cryostat à dilution He_3/He_4
Température limite de 30 mK, configuration horizontale mécaniquement stable



Vers l'état fondamental...

Nanorésonateur couplé à un circuit micro-onde

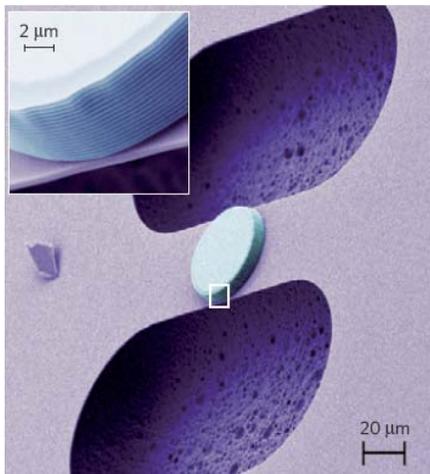


$$\begin{aligned}\Omega_m/2\pi &= 1.5 \text{ MHz} \\ Q &= 300\,000 \\ M &= 6 \text{ pg}\end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned}T_c &= 10 \text{ mK} \\ 140 \text{ phonons}\end{aligned} \right\}$$

K. Lehnert, JILA, 2008
K. Schwab, Cornell, 2009

Micro-miroir



$$\begin{aligned}\Omega_m/2\pi &= 1 \text{ MHz} \\ Q &= 30\,000 \\ M &= 43 \text{ ng}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}T_c &\simeq 2 \text{ mK} \\ 32 \text{ phonons}\end{aligned}$$

M. Aspelmeyer, Vienna, 2009

Micro-tore



$$\begin{aligned}\Omega_m/2\pi &= 62 \text{ MHz} \\ Q &= 2\,000 \\ M &= 3 \text{ ng}\end{aligned}$$

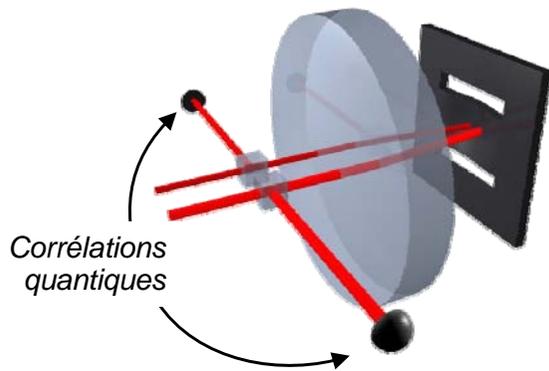
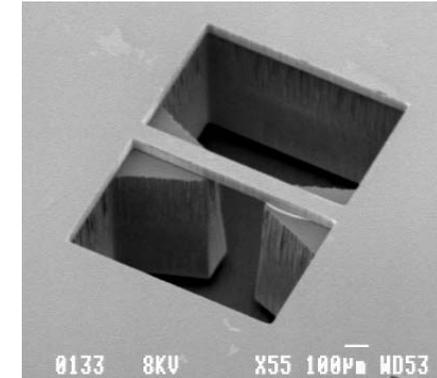
$$\begin{aligned}T_c &\simeq 200 \text{ mK} \\ 63 \text{ phonons}\end{aligned}$$

T. Kippenberg, Garching, 2009

Vers l'optomécanique quantique...

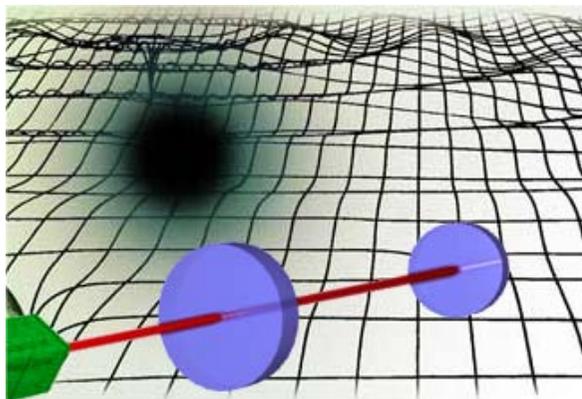
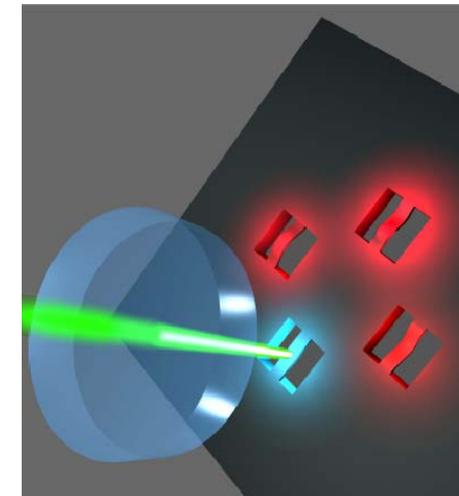
1 – Mesure optique ultra-sensible des déplacements d'un résonateur mécanique

2 – Couplage optomécanique entre la lumière et un système mécanique



→ Action en retour dans les mesures, contrôler le bruit de la lumière

→ Agir au niveau quantique sur un système mécanique macroscopique

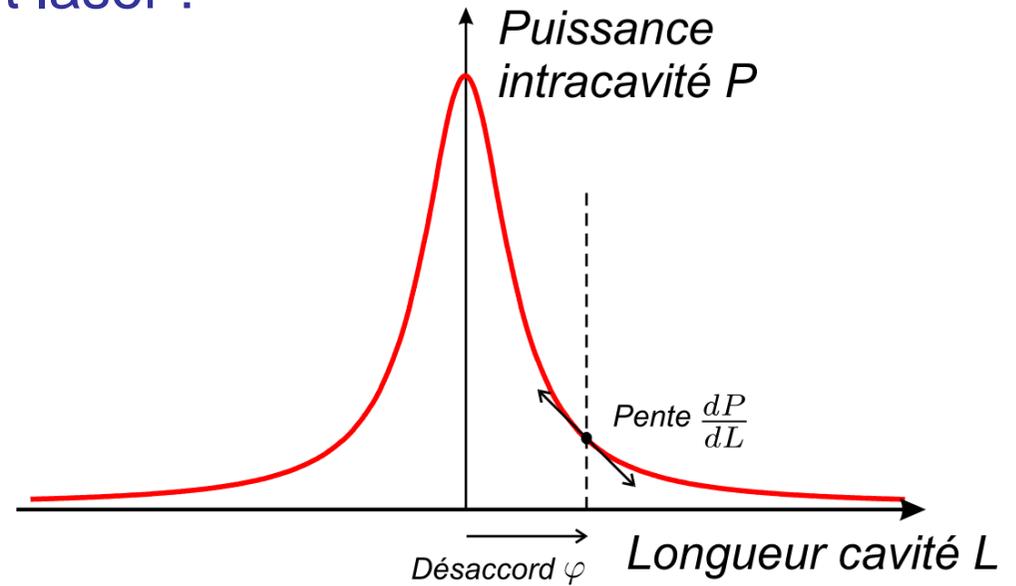
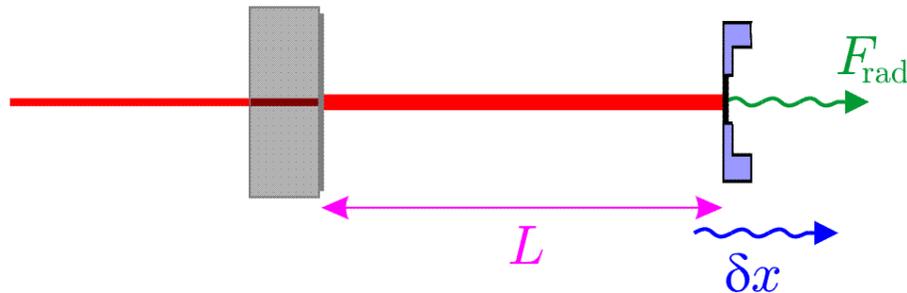


→ Amplification optomécanique d'un signal

Agir au niveau quantique sur un signal ?

Autre interprétation du refroidissement laser :

Pression de radiation dans une cavité désaccordée



Force de rappel :

$$F_{\text{rad}} \propto \frac{dP}{dL} \delta x$$

Modification de la raideur
du micro-miroir (ressort optique)

Retard dû à la dynamique de la cavité :

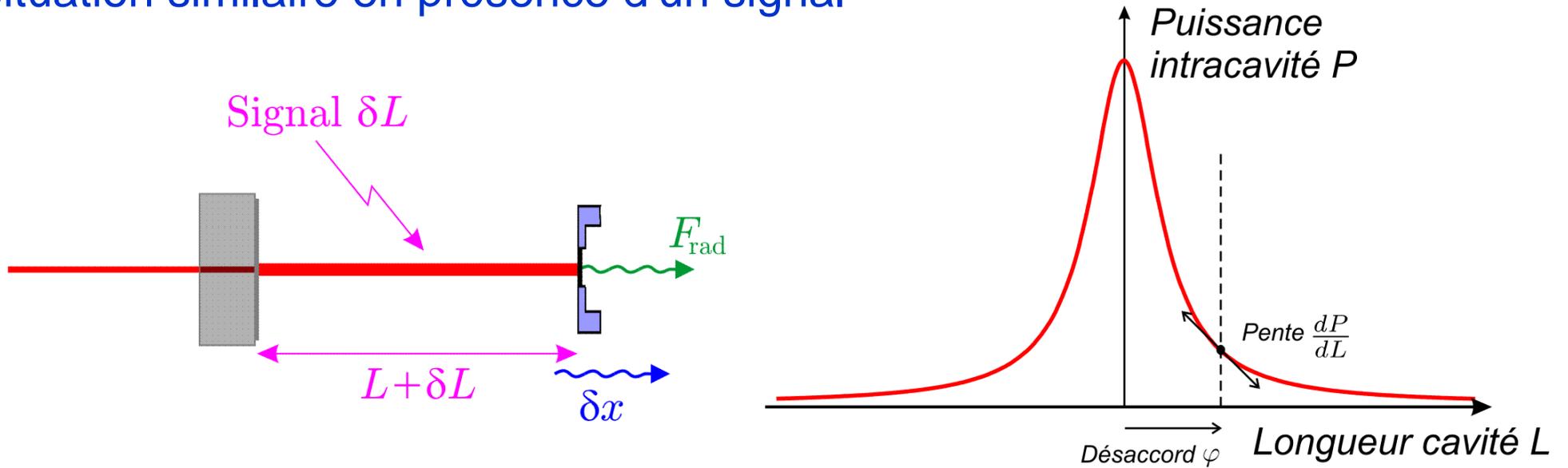
$$\text{Force visqueuse : } F_{\text{rad}} \propto \frac{dP}{dL} \delta v$$

Modification de l'amortissement

→ Refroidissement (friction froide optique)

Agir au niveau quantique sur un signal

Situation similaire en présence d'un signal



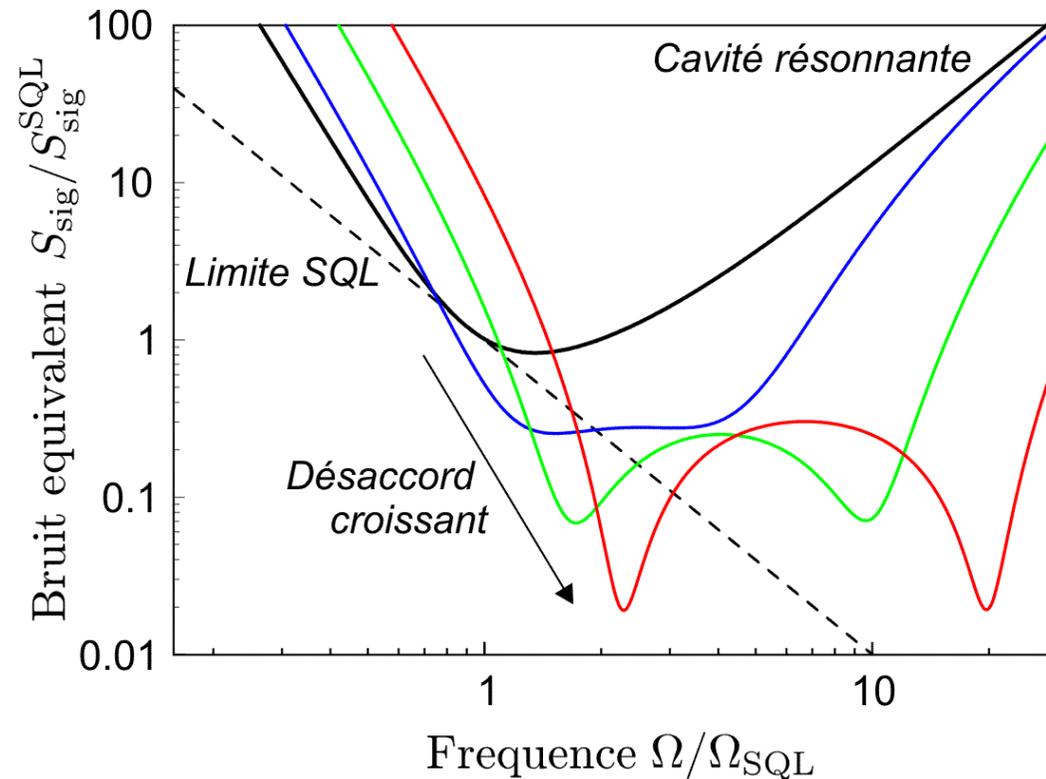
- Signal :
- Onde gravitationnelle
 - Variation apparente de longueur de la cavité
 - Modulation de fréquence du laser ...

La pression de radiation est modulée par le signal

→ Déplacement du miroir proportionnel au signal : $\delta x \propto \frac{dP}{dL} \delta L$

→ La mesure de $\delta x + \delta L$ amplifie le signal

Amélioration de la sensibilité des antennes gravitationnelles

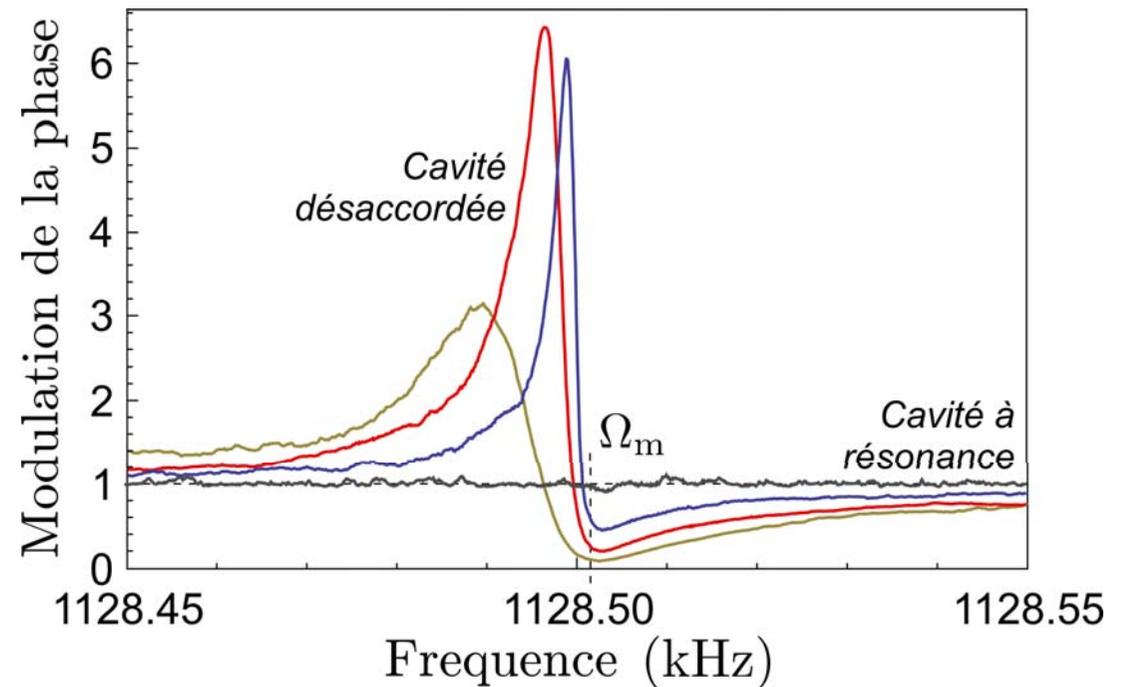
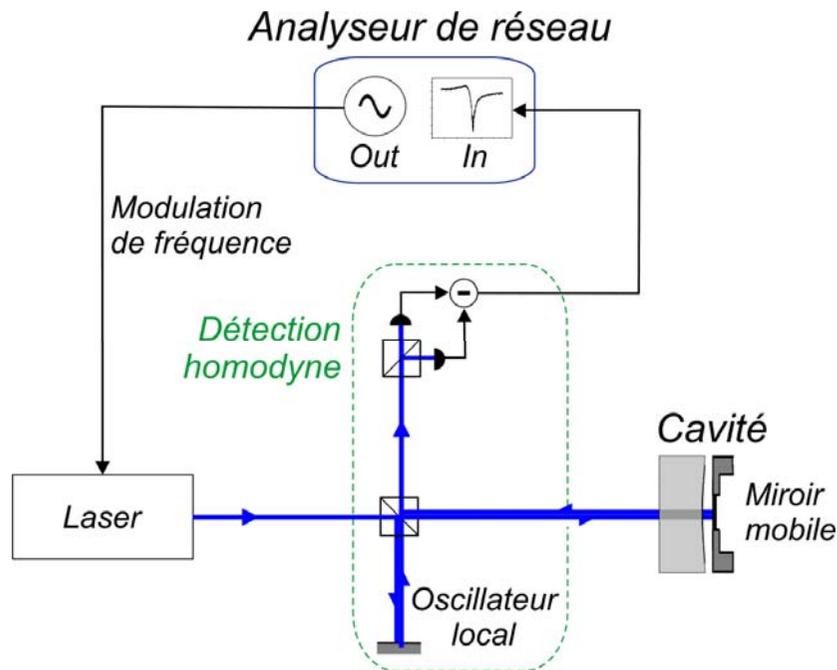


Effet attendu dans les futures générations d'antennes gravitationnelles

- ➔ Permet d'améliorer la sensibilité de l'antenne, de manière sélective sur une plage de fréquence

Démonstration expérimentale

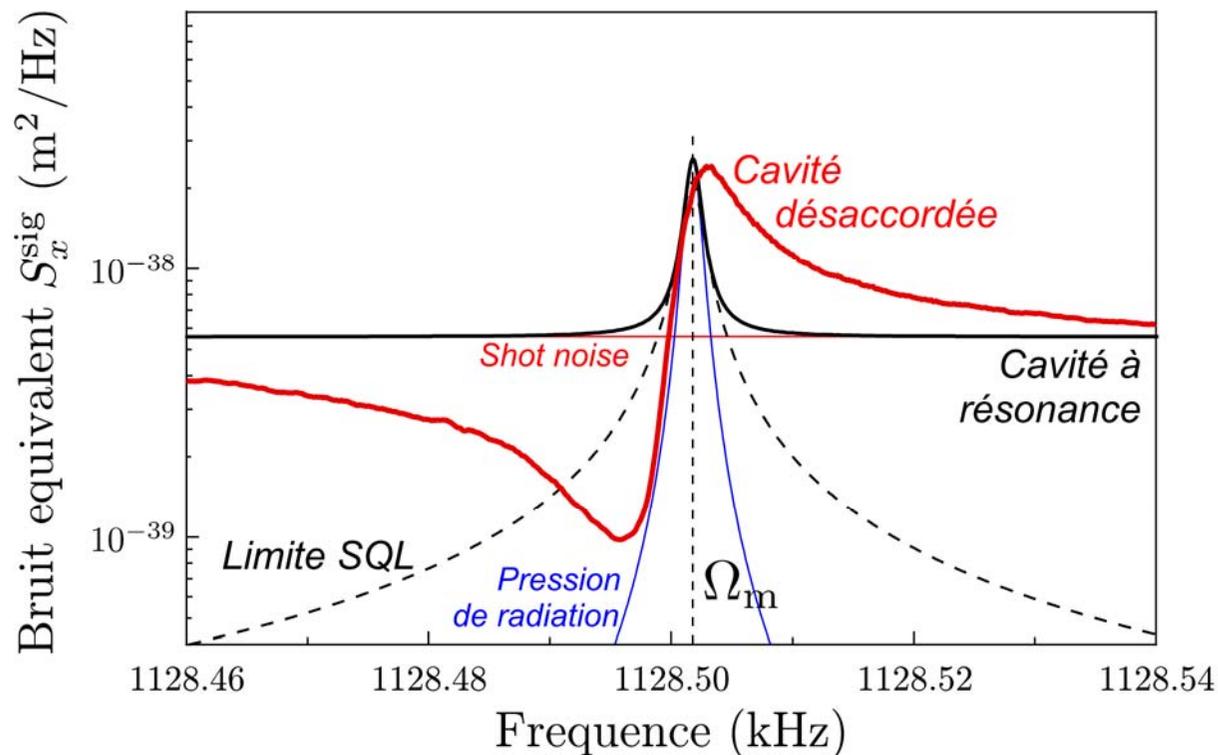
Signal et mesure réalisés par un analyseur de réseau



- A résonance : aucun effet sur le signal
- Pour une cavité désaccordée, le miroir accompagne le signal
→ Amplification du signal par couplage optomécanique

Limite de sensibilité attendue au niveau quantique

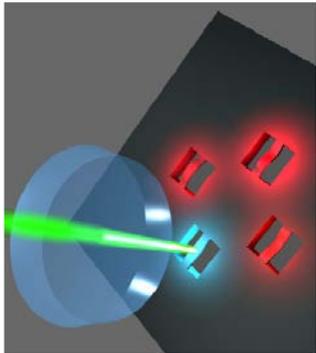
L'amplification du signal se produit sans modifier le bruit quantique !



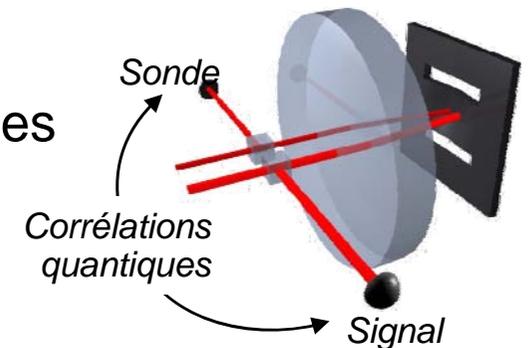
- A résonance : limité par le shot noise et le bruit de pression de radiation
- Cavité désaccordée : l'amplification du signal augmente la sensibilité
→ Amélioration de 5 dB au-delà de la limite quantique

Conclusion

Les systèmes optomécaniques sont proches des limites quantiques !



- Mesure optique à l'échelle de 10^{-20} m
- Observation des corrélations optomécaniques
- Action en retour dans les mesures, refroidissement laser de micro-miroirs



Coupler des résonateurs mécaniques à la lumière :
Manipulation quantique du résonateur et de la lumière

- Régime quantique d'un micro-miroir
Intrication et décohérence d'objets macroscopiques
- Limites quantiques dans les mesures
Amélioration des mesures par couplage optomécanique

