



# RAPPORT DE STAGE

Département de Physique de l'ENS

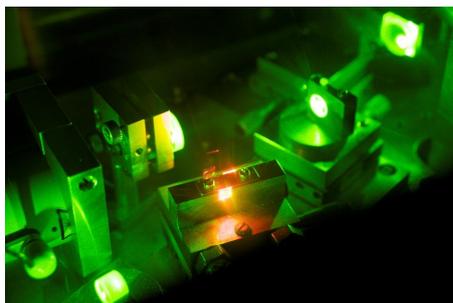
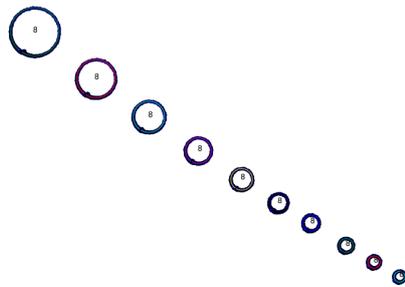
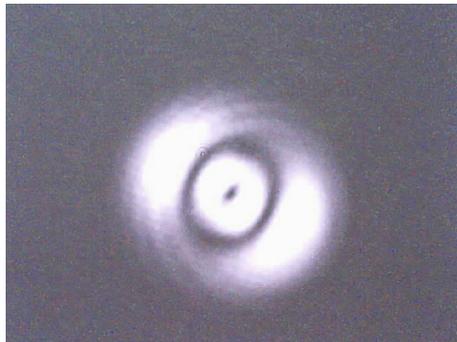
---

## Conception d'une cavité optomécanique cryogénique

---

*Elève :*  
Elie Gouzien

*Supervision :*  
A. Heidmann  
S. Deléglise  
T. Briant



Juillet 2012

# Table des matières

	Introduction . . . . .	2
I	Le cryostat . . . . .	5
	I.1 Le montage . . . . .	5
	I.2 Les points critiques . . . . .	5
II	Cavité de longueur variable . . . . .	8
	II.1 Intérêt . . . . .	8
	II.2 Test d'un montage . . . . .	8
III	Miroir de quartz . . . . .	10
	III.1 Avantages . . . . .	10
	III.2 Étude de faisabilité . . . . .	10
	Conclusion . . . . .	14

## Résumé

Pour mon premier stage dans un laboratoire, j'ai été amené à préparer le passage en cryogénie d'une expérience. L'équipe de Mesure et Bruits Fondamentaux cherche à comprendre les limitations quantiques liées aux fluctuations de pression de radiation lorsque l'on cherche à effectuer une mesure interférométrique de distance. Mais passer de la température ambiante à 4K n'est pas une opération triviale. Il a fallu contrôler les caractéristiques d'un cryostat ; étudier les vibrations d'une cavité Fabry-Perot de grande finesse ; évaluer la distance jusqu'à laquelle une électrode peut être éloigné du cristal de quartz qu'elle est censée exciter. Ce travail a permis la conception d'une nouvelle cavité qui, espérons-le, sera en mesure de répondre aux attentes de l'équipe.

## Abstract

For the first laboratory internship, I had to prepare an experiment to go into an helium fridge. The team "Mesure et Bruits Fondamentaux" is involved in understanding quantum limits in length measurement due to the radiation pressure fluctuations. Going down from 300 K to 4 K is not an easy task. I had to design and test a cryogenic setup ; evaluate noise of a high finesse Fabry-Perot cavity ; estimate the maximum length between quartz and electrode. This work has cleared the way for designing a new cavity. Let's hope success for it.

## Introduction

L'interférométrie optique est un outil puissant permettant d'effectuer des mesures de position très précises. Un « simple » interféromètre de Michelson permet déjà d'atteindre une précision de l'ordre de la centaine de nanomètres. Il est possible d'améliorer cette sensibilité en insérant une cavité Fabry-Perot. Dans un interféromètre de Fabry-Perot la lumière ne se contente pas d'un simple aller-retour. La précision est d'autant plus grande qu'il y a de réflexions internes. Avec de très bons miroirs, on arrive à détecter des variations de longueur de la cavité ayant pour densité d'amplitude spectrale  $10^{-20} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ . De telles précisions doivent permettre de mettre en évidence des phénomènes jamais observés. La détection d'ondes gravitationnelles en est le plus célèbre exemple. Mais l'interférométrie permet également de détecter de très faibles forces ; on peut ainsi déceler le retournement d'un spin unique ou bien de mesurer la force de casimir.

Mais les systèmes optomécaniques ne sont pas que de simples outils pour d'autres physiciens. En effet ils soulèvent le problème fondamental de la mesure quantique. Il est légitime de se demander quelle est la précision maximale que l'on peut atteindre avec des miroirs donnés. Augmenter l'intensité revient à sonder la position du miroir avec de plus en plus de photons, on améliore ainsi la précision sur la mesure de la longueur de la cavité. Mais à forte intensité les effets de pression de radiation sur les miroirs ne sont plus négligeables et doivent, théoriquement perturber la mesure.

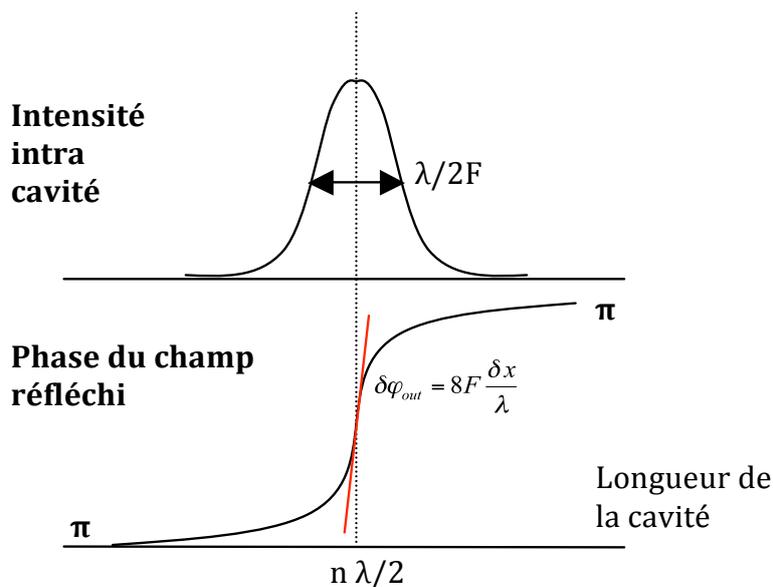


FIGURE 1 – Intensité et phase autour de la résonance pour un interféromètre de Fabry-Perot. Récupérer la phase du faisceau réfléchi autour de la résonance est la méthode de mesure de longueur la plus précise, surtout avec une grande finesse  $\mathcal{F}$ .

Ainsi, pour une mesure de position exploitant la phase du faisceau réfléchi, la présence simultanée de fluctuations quantiques de phase du faisceau incident et des effets de la fluctuation de pression de radiation (liée aux fluctuations d'intensité du faisceau incident) engendre un minimum de bruit quantique pour une intensité donnée. La limite liée à ce minimum est appelée *limite quantique standard*.

L'équipe « Mesure et Bruits Fondamentaux » qui m'a accueilli cherche à mettre en évidence l'effet des fluctuations quantiques de pression de radiation, et en étudier les conséquences sur les limites de sensibilités dans les mesures de position. L'expérience se

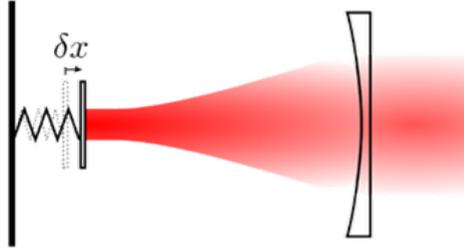


FIGURE 2 – Modèle de cavité avec un seul miroir mobile

fonde sur une cavité Fabry-Perot dont un miroir est mobile, dans laquelle sont injectés deux faisceaux lasers, tous deux résonants avec la cavité :

- Un faisceau pompe intense, dont la pression de radiation a un effet notable sur les miroirs.
- Un faisceau sonde peu intense avec lequel on mesure la longueur de la cavité via la phase du faisceau réfléchi. Ce faisceau sert à mesurer la perturbation induite par le faisceau intense sur le système. Ce faisceau est peu intense pour ne pas perturber la mesure de position qu'il réalise.

Ainsi mettre en évidence les effets quantiques de pression de radiation consiste à comparer les fluctuations d'intensité du faisceau intense avec les fluctuations de position du miroir.

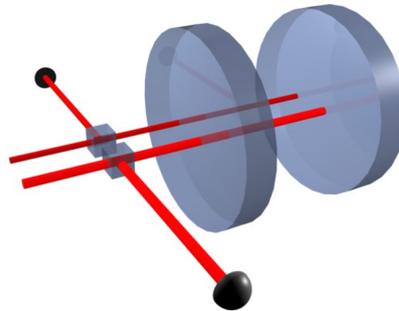


FIGURE 3 – Dispositif de double injection

Mais en pratique le mouvement thermique des miroirs domine le bruit quantique. En considérant que le laser est dans un état cohérent et que le miroir arrière est un oscillateur harmonique amorti tandis que le miroir d'entrée (appelé coupleur) est fixe, le calcul [1] donne pour le rapport bruit quantique de pressions de radiation sur bruit thermique la formule suivante :

$$\frac{S_x^{rad}}{S_x^T} \simeq 32 \frac{\hbar^2 \mathcal{F}^2 \bar{I}^{in}}{\lambda^2} \frac{Q}{k_B T M \Omega_0} \quad (1)$$

Avec :

- $\frac{S_x^{rad}}{S_x^T}$  Le rapport de l'intensité des bruits de pression de radiation et thermique.
- $\mathcal{F}$  la finesse de la cavité (nombre moyen d'aller retour d'un photon).
- $\lambda$  la longueur d'onde du faisceau
- $\bar{I}^{in}$  l'intensité incidente moyenne
- $M$ ,  $\Omega_0$  et  $Q$  la masse, pulsation propre et facteur de qualité du miroir

À 300 K et avec les miroirs actuellement utilisés, le bruit thermique est environ mille fois plus important que les effets de la pression de radiation. Il est donc très difficile de mettre en évidence ces derniers. Une première étape pour réduire le bruit thermique est de ne plus travailler à température ambiante comme c'est le cas actuellement, mais de passer en cryogénie. Passer de 300 K à 4K avec un cryostat à hélium liquide permettrait de réduire d'un facteur 100 le bruit thermique ; et donc d'avoir un bruit thermique seulement dix fois plus important que le signal qui nous intéresse. Augmenter  $\mathcal{F}$  et  $Q$  est également envisageable. Mais il est extrêmement compliqué d'obtenir simultanément des qualités optique et mécanique exceptionnelles.

L'objet de mon stage a été d'adapter la cavité optomécanique pour pouvoir l'utiliser à des températures cryogénique. Le premier pas est bien évidemment de trouver un cryostat qui sera compatible avec les exigences de l'optomécanique.

# I Le cryostat

Jusqu'à présent la cavité servant à l'expérience était à température ambiante. La grande sensibilité du système aux vibrations ainsi que la nécessité de disposer d'un accès optiques sont assez contraignant pour le choix du cryostat. Pour faire son choix l'équipe a emprunté un cryostat à une équipe de l'EPFL à Lausanne afin d'effectuer des tests d'alignement et de vibrations.

## I.1 Le montage

Le cryostat de test est un cryostat à circulation d'hélium liquide de type « optistat SXM » d'oxford instruments. Sa géométrie intérieure est un tube vertical. La cavité est tenue par une tige. Il y a deux fenêtres : une sur la face horizontale inférieure et une autre sur la face verticale. On peut ainsi placer l'axe optique verticalement, avec le faisceau incident venant du bas. Cela permet à l'alignement de ne pas être trop perturbé par la contraction thermique de la tige lors de la descente à froid et donc de ne pas avoir à refaire complètement le réglage. Le faisceau émergent est renvoyé vers la fenêtre latérale par un miroir à 45°. L'alignement de la sortie n'est pas critique et peut bouger durant le refroidissement sans grandes conséquences.

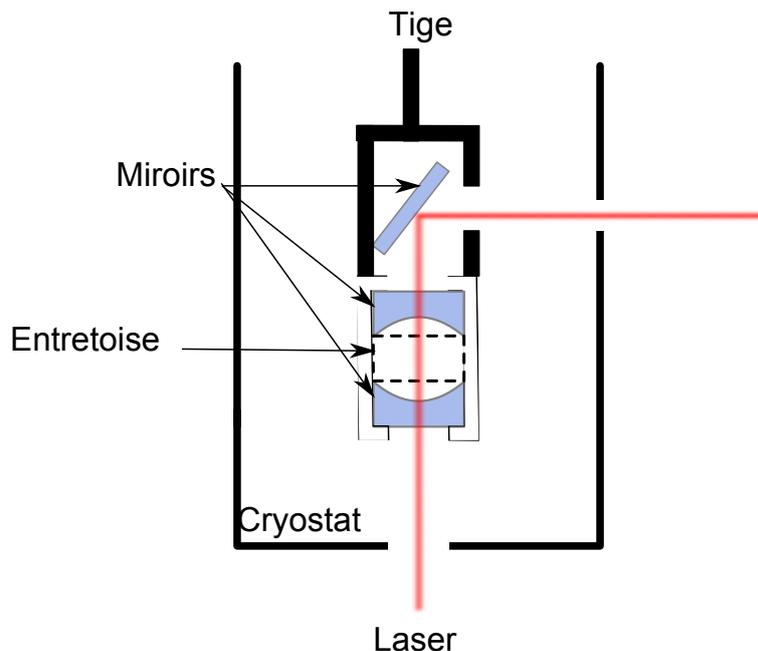


FIGURE 4 – Montage de la cavité dans le cryostat

À l'intérieur de ce cryostat les échanges thermiques se font via un gaz de thermalisation (hélium). Ceci permet d'isoler la cavité des vibrations techniques tout en assurant un bon refroidissement. La tige sert d'isolation mécanique qui ne laisse passer que les vibrations à basses fréquences.

## I.2 Les points critiques

**Vibrations** Le problème des vibrations est crucial : la cavité optomécanique étant extrêmement sensible aux vibrations, il est nécessaire de très bien l'isoler de toutes les vibrations techniques. Ces vibrations ont des fréquences faibles devant celles qui intéressent

l'optomécanique. Mais des vibrations trop importantes à basses fréquences empêchent les asservissements de maintenir le laser à résonance avec la cavité.

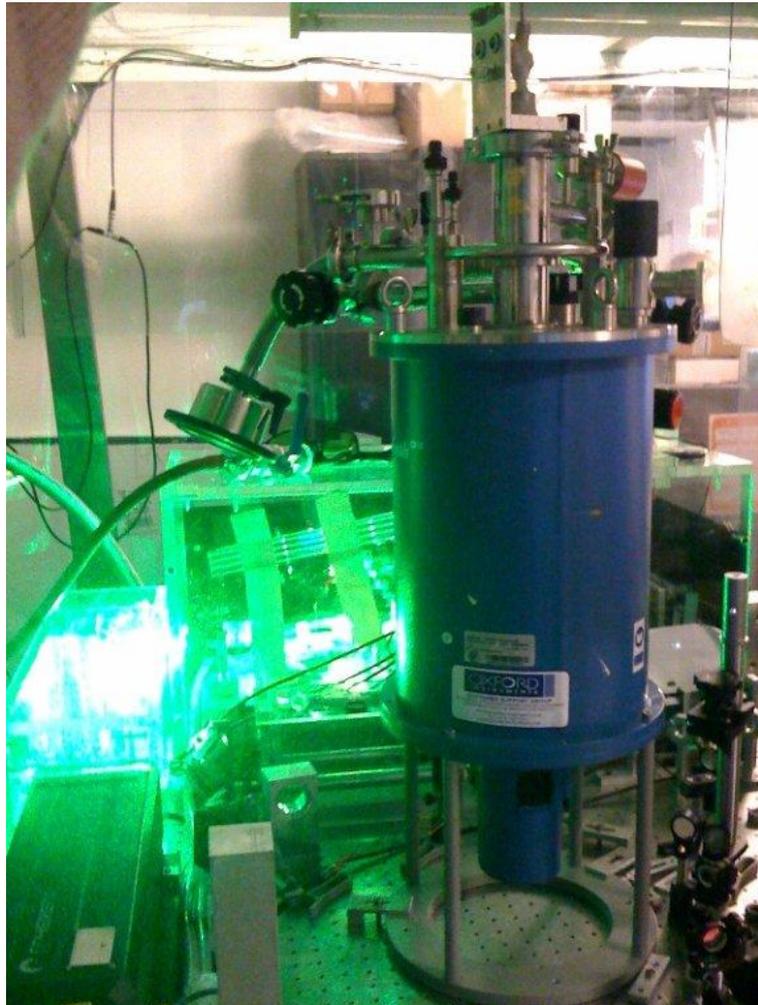


FIGURE 5 – Le cryostat de test

Ce problème était apparu lors d'une première tentative de passage en cryogénie : le refroidissement se faisait par un doigt froid très mal isolé mécaniquement. Les vibrations empêchaient de maintenir le laser résonant avec la cavité.

Pour s'assurer qu'un tel problème n'arriverait pas, nous avons effectué des essais sur le cryostat de test. Un premier test avait déjà été réalisé : On forme un interféromètre de Michelson en plaçant un miroir dans le cryostat ; il constitue le premier bras. Le second bras est formé d'un second miroir placé sur la table optique, sur un support rigide. On mesure ainsi les déplacements du miroir interne par rapport au miroir externe supposé fixe. Ce test a permis de montrer que l'amplitude des vibrations (basses fréquences) est de l'ordre de la longueur d'onde du laser (infrarouge proche), ce qui est convenable.

Nous avons essayé d'estimer comment ces vibrations sont transmises aux miroirs d'une cavité Fabry-Perot. En particulier est-il possible d'asservir la fréquence laser sur la cavité à froid et en présence du gaz d'échange ?

Pour effectuer ces tests, il est nécessaire d'aligner la cavité. Cela ne pose pas de problème hors du cryostat (quand les miroirs sont convenablement fixés). Le cryostat de test ne présentait pas de fenêtre pour observer la cavité en transmission. On a donc essayé de

procéder à l'alignement en ne regardant que le faisceau réfléchi.

Une fois l'alignement à peu près effectué, moduler le laser en fréquence permet de visualiser le pic d'Aizy à l'aide d'une photodiode placée sur le faisceau réfléchi. L'alignement fin de la cavité se fait en maximisant ce signal. On avait alors l'espoir que contraindre la trajectoire du laser à l'aide de diaphragmes suffirait pour observer une résonance en réflexion.

Cette technique a permis d'effectuer des réglages suffisamment fins pour observer en transmission directement des modes symétriques. Elle est par contre insuffisante pour effectuer entièrement l'alignement en réflexion : il est plus difficile de déceler un faible manque de lumière que de la lumière dans le noir. La mise en place de technique plus fines aurait été une perte de temps : certains modèles de cryostats ont suffisamment de fenêtres.

**Mesure du désaccord** En plus des faisceaux pompe et sonde injectés dans la cavité, l'équipe utilise un troisième faisceau réfléchi sur la face arrière du miroir de la cavité. Ce faisceau auxiliaire est bien plus intense que la pompe et la sonde, et sert à appliquer une force supplémentaire sur le miroir mobile par pression de radiation. Il permet ainsi d'exciter les modes propres du miroir, et participe également aux systèmes d'asservissement.

L'angle d'incidence de ce faisceau doit rester fort pour ne pas qu'il pénètre dans la cavité et la détruise. Cependant dans un cryostat avec des accès optiques étroits, l'angle d'incidence risque d'être trop faible.

Il faut donc trouver un autre moyen d'exciter le miroir mobile. Une solution pourrait être d'utiliser une cale piézoélectrique.

## II Cavité de longueur variable

Le plus simple est de placer un des miroirs sur une cale piézoélectrique. Voyons l'intérêt que cela peut avoir.

### II.1 Intérêt

**Mesure du désaccord** L'intérêt de placer le miroir mobile sur une cale piézoélectrique est double. D'une part il serait possible d'exciter mécaniquement les modes du miroir sans avoir injecté de faisceau laser sur le miroir. D'autre part la cale peut être utilisée pour l'asservissement de la cavité.

Actuellement pour rester à la résonance, le laser est asservi sur la longueur de la cavité. Mais entre le laser et la cavité il y a de nombreuses cavités de filtrage. Il faut donc asservir ces cavités sur le laser. Ceci donne un système d'asservissement plutôt complexe. Fixer la longueur d'onde du laser puis asservir les cavités de filtrage et enfin la cavité optomécanique sur cette longueur d'onde serait beaucoup plus simple. Il serait dommage de laisser passer une telle simplification.

Mais encore une fois, pour que les asservissements fonctionnent convenablement, il faut que la cavité soit stable pour être le moins sensible possible aux vibrations. C'est pourquoi nous avons décidé de tester une cavité construite sur ce principe.

### II.2 Test d'un montage

L'objectif du test est de déterminer si le design d'une cavité avec une cale piézoélectrique est suffisamment stable du point de vue des vibrations. Ces tests sont effectués sur la table optique en dehors du cryostat.

**Description du montage** La cavité est composée d'un miroir plan (sur un substrat plan convexe) fixé sur une cale piézoélectrique. Le coupleur d'entrée est un miroir sphérique monté sur un support permettant de régler le parallélisme avec le miroir plan.



FIGURE 6 – La cavité avant montage

L'isolation électrique de la cale piézoélectrique nécessite de placer plusieurs pièces en P.V.C. dans la cavité. Ces différentes pièces sont collées entre elles.

**Description des réglages** La cavité étant plan concave, l'axe optique de la cavité est le diamètre du miroir sphérique perpendiculaire au plan du miroir plan. Mais il faut encore que le parallélisme des miroirs soit suffisamment bien réglé pour que la calotte sphérique qu'est le coupleur intercepte l'axe optique.

Ce réglage est difficile avec le laser infrarouge car celui-ci ne traverse pas la cavité hors résonance. C'est pour cela que j'ai utilisé un laser rouge (hélium néon) en entrant par l'arrière de la cavité. En effet les miroirs sont peu réfléchissant pour la lumière rouge et on peut donc visualiser les différentes tâches de réflexion et de transmission.

Le réglage se fait alors en deux temps : on commence par régler le laser rouge pour être perpendiculaire au miroir plan (donc que le principal faisceau réfléchi reviennent parallèle au faisceau incident) puis on touche aux réglages des vis du coupleur de manière à ramener tous les faisceaux transmis en un seul point. On s'assure ainsi que l'axe optique de la cavité passe à peu près par le centre des miroirs.

Maintenant que les miroirs sont réglés, il faut aligner le laser infrarouge sur l'axe optique de la cavité. Ceci se fait en deux temps. On commence par régler l'incidence du laser de manière à obtenir un faisceau réfléchi coïncidant avec le faisceau incident. Ensuite, on regarde en transmission. En jouant sur les vis et en modifiant la fréquence du laser on voit rapidement apparaître un mode de Gauss-Hermite. La deuxième étape consiste à passer de ce mode (quelconque) au fondamentale ( $TEM_{00}$ ), et à l'aligner parfaitement. Enfin on module la fréquence du laser et on regarde en transmission avec une photodiode. On peut alors directement visualiser le pic d'Airy sur un oscilloscope.

**Résultat** Une fois ces réglages effectués, nous avons constaté que la position du pic d'Airy bouge en fréquence sur une plage de fréquence plus de 15 fois supérieur à sa largeur. Les vibrations sont donc extrêmement importantes. Dans l'idéal on aurait pu mettre en place l'asservissement du laser sur la longueur de la cavité, puis récupérer le spectre du bruit à partir du signal d'erreur. Malheureusement une panne du laser nous a contraints à nous contenter du résultat déjà exposé.

La conclusion de ce test est que ce modèle de cavité, avec toutes les pièces utilisées pour l'isolation électrique, n'est pas assez stable. Cela ne peut qu'empirer lors d'une descente à 4 K : les différents matériaux se comportent différemment et la colle qui maintient le miroir peut ne pas bien tenir au froid.

De plus les miroirs sont pour l'instant déposés sur un substrat de silice. Ce matériau a un mauvais comportement mécanique à basse température. Pourquoi alors ne pas changer le substrat des miroirs afin de résoudre tous les problèmes d'un seul coup ?

## III Miroir de quartz

Le miroir mobile des cavités utilisées était jusqu'à présent en silice. Ce matériau avait été choisi principalement en raison de la grande maîtrise des techniques de dépôt de miroirs diélectriques. De plus ce matériau a un facteur de qualité mécanique de l'ordre de  $10^7$  à température ambiante. Comme on peut le voir dans l'équation (1), une bonne qualité mécanique est favorable à la mise en évidence des effets de la pression de radiation. Cependant la silice étant amorphe, à basse température le facteur de qualité du matériau diminue et atteint  $10^4$  vers 20 K avant de remonter progressivement. Remplacer la silice par du quartz est tout à fait envisageable et présente de nombreux avantages.

### III.1 Avantages

**Bonne qualité mécanique** Les oscillateurs à quartz sont utilisés dans toutes les horloges. Comme la qualité mécanique d'un oscillateur permet sa stabilité en fréquence, des oscillateurs à quartz de très grandes qualités mécaniques ont été mis au point. Les meilleurs oscillateurs ont des facteurs de qualité de l'ordre de  $10^9$ . Ils sont donc (au moins sans miroirs) environ cent fois moins dissipant que ceux en silice. Un tel facteur se retrouve dans le rapport bruit de pression de radiation sur bruit thermique.

**Compatibilité avec la cryogénie** À la différence de la silice, les modes de contraction du quartz voient leurs qualités mécaniques s'accroître lorsque la température baisse. Ainsi le quartz est un matériau tout à fait adapté à l'utilisation cryogénique.

**Utilisation de l'effet piézoélectrique** Le quartz présente également la caractéristique d'être un matériau piézoélectrique. Ainsi on peut espérer utiliser cet effet pour modifier légèrement, et à souhait, la longueur de la cavité. Il serait ainsi possible d'utiliser directement le substrat du miroir pour asservir la cavité ou exciter les modes mécaniques du miroir. Cela permettrait d'éviter d'avoir à recourir à une cale piézoélectrique ou au faisceau auxiliaire.

Mais pour cela il faudra encore être capable de maintenir le quartz sans détériorer la qualité mécanique de celui-ci. Il faudrait ensuite être capable d'exciter ce matériau piézoélectrique sans y coller d'électrodes (ce qui détériorerait de la qualité mécanique).

Afin de s'assurer de la faisabilité de telles choses, j'ai procédé à des tests sur une pastille de quartz.

### III.2 Étude de faisabilité

La question était de savoir s'il est possible de maintenir le miroir en quartz dans la cavité et de l'exciter électriquement. Le tout doit être fait sans trop dégrader ses qualités mécaniques, et en ayant si possible recours à des techniques de fabrication disponible à l'atelier de mécanique du laboratoire.

Deux questions n'avaient pas de réponses immédiates : À quelle distance du quartz peut-on raisonnablement placer des électrodes afin d'exciter un cristal piézoélectrique ? Quel déplacement peut-on obtenir, et avec quel voltage ? Pour cela j'ai commencé par rechercher dans la littérature les ordres de grandeur du quartz. Mais le quartz est presque toujours étudié à résonance et quasiment exclusivement de manière électrique avec des électrodes déposées directement sur le cristal.

Je me suis alors attaqué expérimentalement au problème de la distance électrodes-quartz.

**Les différents montages** Pour réaliser une telle étude, j'ai pu utiliser un cylindre de quartz. Trois montages successifs ont alors été réalisés, chacun étant plus performants que le précédent.

Les électrodes du premier montage étaient des rondelles que j'ai soudées à un connecteur. Les rondelles étaient alors serrées l'une contre l'autre à l'aide d'une plaque et d'écrous métalliques et de vis en plastique. Le quartz était pris en sandwich à l'intérieur.

Ce montage a permis de distinguer très clairement les modes de résonance du quartz en observant à l'analyseur de réseaux. On a testé en mettant une simple lame de verre ; les résonances disparaissaient. Le problème de ce montage et qu'en appuyant fortement sur le quartz, les électrodes réduisent le facteur de qualité des résonances.

Pour le deuxième montage, les électrodes ont été remplacées par des plaques de circuits imprimés ; la visserie utilisée était en plastique. Le principal avantage de ce deuxième montage sur le premier, outre qu'il permet de moins écraser le quartz, et que sa géométrie autorise l'insertion de feuilles de papier entre la pastille de quartz et l'électrode. Cette technique avait été envisagée pour modifier précisément la distance électrodes quartz. Mais le changement d'épaisseur de papier était extrêmement long.

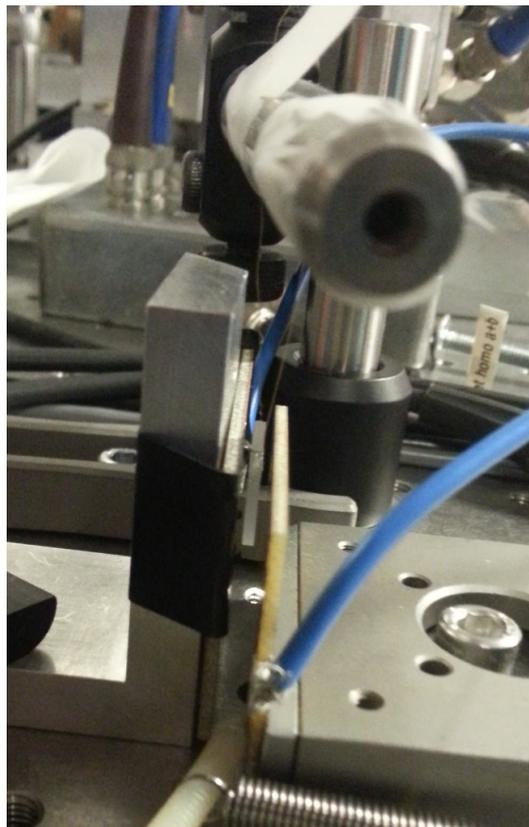


FIGURE 7 – 3<sup>ème</sup> montage.

Le troisième modèle est nettement plus évolué que ces deux précédents. La pastille de quartz est suspendue par un fil micrométrique et ne touche donc pas les électrodes. La qualité mécanique n'est est que meilleure. Une des électrodes est maintenue fixe très

proche du quartz. La deuxième est placée sur un support à vis micrométrique. On peut donc régler avec précision la distance électrodes quartz.

L'appareil utilisé pour faire la mesure est toujours un analyseur de réseau. Il envoie des excitations sinusoïdales et recueille l'intensité et la phase réfléchi. Mais cet appareil a un taux d'échantillonnage limité. Le facteur de qualité mécanique des résonances étant plutôt élevé, si on fait un balayage sur une plage de fréquences trop large, les pics risquent de tomber entre deux points de l'analyseur ; alors on ne les verra pas. Au contraire si on balaye une plage de fréquence trop faible, les résonances seront hors de l'écran.

**Automatisation** Pour pallier à ces difficultés, on a automatisé l'acquisition de données. L'analyseur de réseaux peut être piloté par ordinateur et il ne restait plus qu'à coder un petit programme pour faire un premier balayage grossier et repérer les différentes fréquences de résonance de la pastille. Ensuite programme détecte les pics et lance une acquisition centrée sur chacun d'entre eux. Il a ainsi été possible d'acquérir assez rapidement le spectre complet, avec beaucoup de précisions sur les zones intéressantes, pour chaque distance entre électrodes et quartz.

**Traitement des données** Lors de l'éloignement des électrodes, le facteur de qualité des modes n'est pas censé varier sensiblement. Par contre l'amplitude va diminuer. Pour quantifier l'effet et de l'éloignement des électrodes, on cherche à obtenir une mesure expérimentale de l'amplitude. Obtenir l'amplitude à partir d'une courbe en cloche n'est pas évident : la position du sommet n'est jamais clairement identifiable à cause du bruit de mesure. Mais nous avons toujours l'information sur la phase. Autour de chaque résonance, on s'attend à obtenir un cercle (représentation d'une lorentzienne dans le plan complexe). Ainsi le traitement de données consiste à ajuster un cercle sur les points expérimentaux.

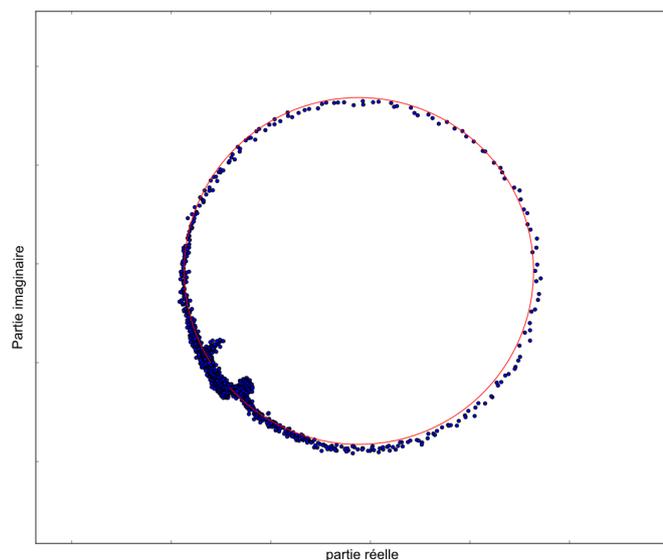


FIGURE 8 – Ajustement d'un cercle sur les données expérimentales. Le repère est ortho-normé, les unités étant arbitraires.

Bien qu'apparemment facile, mettre au point un logiciel qui réussissent à ajuster un

cercle sur des points qui n'en forment pas vraiment un est un véritable défi. Le logiciel programmé ici se révèle suffisant pour travailler sur les résonances les plus importantes. Il a été écrit en python (langage découvert pour l'occasion) et repose sur la minimisation de l'écart entre les points expérimentaux et la courbe de modélisation. Les conditions initiales sont choisies de manière à avoir une chance que l'algorithme converge vers le bon cercle.

**Résultats** Le résultat de l'expérience est plutôt encourageant. L'amplitude des vibrations n'est réduite qu'environ de moitié pour un éloignement d'un millimètre. Il sera donc tout à fait réalisable de placer des électrodes dans la cavité, à proximité du miroir sans y être collé. Ceci devrait permettre de contrôler la longueur de la cavité sans détériorer le facteur de qualité mécanique.

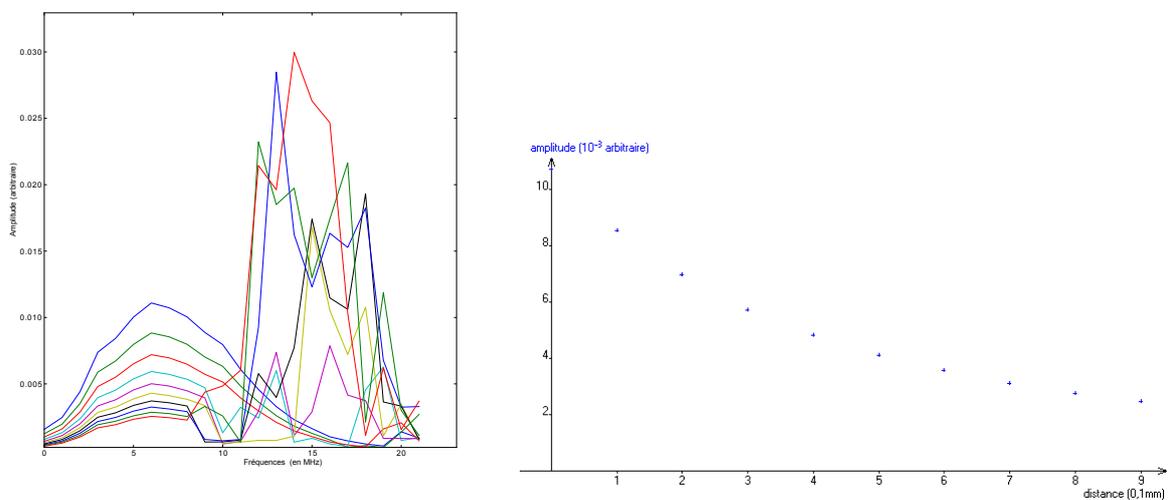


FIGURE 9 – Amplitude des résonances. À gauche en fonction de la longueur d'onde pour différents éloignements de l'électrode. À droite en fonction de l'éloignement des électrodes pour un mode donné

## Conclusion

Pour conclure ce stage, nous avons vu que le cryostat envisagée a de sérieuses chances de satisfaire à l'expérience. Nous avons également vu que si l'utilisation d'une cale piézo-électrique à l'intérieur de la cavité n'est pas envisageable, l'utilisation de l'effet piézoélectrique du substrat en quartz l'est.

Maintenant que certains points ont été éclairés, on peut désormais s'attaquer au design de la cavité avec le cahier des charges suivant.

- L'axe optique sera vertical et le faisceau transmis sera déviée par un miroir à  $45^\circ$ .
- Il faudra éviter le plus possible les pièces intermédiaires qui risquent de vibrer.
- On évitera les cales piézoélectriques à l'intérieur de la cavité.
- Le miroir déposé sur un substrat de quartz devra être maintenu avec la plus grande attention.
- La cavité devra être pensée de manière à inclure des électrodes à quelques dixièmes de millimètres du miroir.

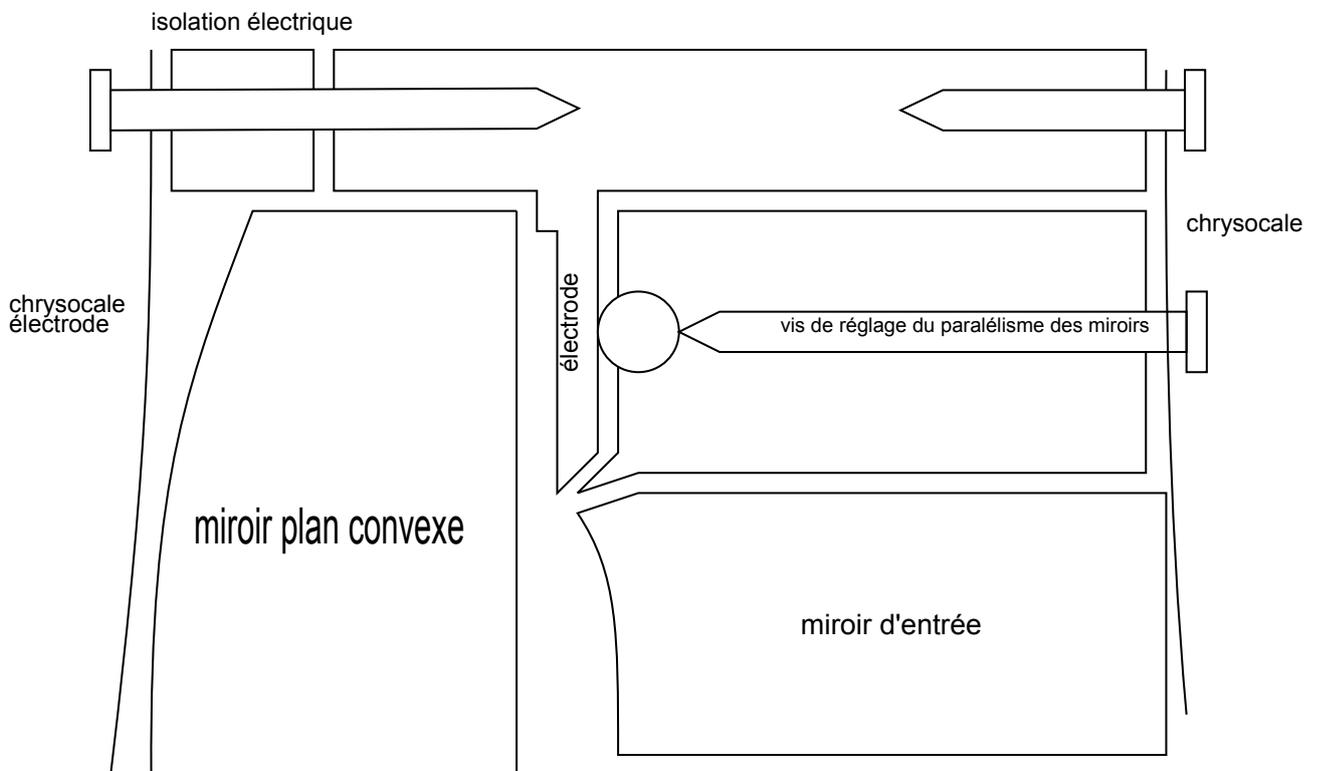


FIGURE 10 – Schéma de principe en demi-coupe de la prochaine cavité

## Remerciements

Je tiens à remercier l'ensemble de l'équipe Mesure et Bruits Fondamentaux pour leur accueil chaleureux en ce mois de juillet pourtant glacial. Sans eux, les miroirs ne seraient encore pour moi que de simples miroirs.

Je tiens tout particulièrement à remercier ceux que j'ai le plus côtoyés :

Antoine Heidmann pour ses sages conseils, Tristan Briant pour sa curiosité contagieuse, Samuel Deléglise pour son optimisme suicidaire et Alexandros Tavernarakis sans qu'il n'y ait besoin de chercher d'excuse.

Je n'oublie pas les autres membres et ex-membres de l'équipe.

Je remercie également les ateliers de mécanique et d'électronique du laboratoire qui m'ont épargné de grandes souffrances.

Je remercie également les familles, épouses, compagnes et poules des chercheurs pour leur grande patience.

Et enfin, mes derniers remerciement vont à tous les anonymes qui ont pris la peine de mettre à disposition du public leurs connexions internet.

# Bibliographie

- [1] Étude des effets de pression de radiation et des limites quantiques du couplage optomécanique, Thèse de l'Université Paris VI, Pierre Verlot