

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Nom du laboratoire : FEMTO-ST – CNRS UMR6174- Dépt. Temps-Fréquence

Adresse du laboratoire : 26 rue de l'épitaphe 25030 Besancon Cedex.

Nom du directeur de thèse : Yann Kersalé, PR ENSMM

Nom de l'encadrant : Yann Kersalé, PR ENSMM (40%) et J. Millo , IR ENSMM(60%)

Email : yann.kersale@femto-st.fr,

Conception d'un laser stabilisé en fréquence sur une cavité Fabry-Perot à très basse température

Ce projet s'inscrit dans le cadre général du développement de références secondaires de fréquences, thème de prédilection du département Temps-Fréquence de l'institut FEMTO-ST. Il concerne plus particulièrement la réalisation de lasers stabilisés en fréquence sur des cavités Fabry-Perot cryogéniques. La cavité qui peut être considérée comme un résonateur optique, est donc la référence de fréquence. Dans les expériences où la cavité est à température ambiante, les performances sont limitées par son bruit thermique. En termes de stabilité relative de fréquence, estimé à l'aide de l'écart type d'Allan, ces performances sont de l'ordre de 10^{-16} pour des temps de mesure de quelques secondes et pour les systèmes les plus optimisés.

Récemment, la PTB (Allemagne) et le JILA (Etats-Unis)¹ ont développés une cavité Fabry-Perot en silicium refroidie à 124 K (point d'inversion du coefficient d'expansion linéaire du silicium) pour stabiliser la fréquence d'un laser. La stabilité de fréquence obtenue est meilleures que 10^{-16} en valeur relative. L'utilisation de températures réduites permet de gagner sur le plancher imposé par le bruit thermique. Dans ce cas, il est calculé au niveau de 7.10^{-17} .

Le projet de thèse présenté ici concerne d'une part la finalisation d'un laser stabilisé sur une cavité Fabry-Perot refroidi à 17 K et d'autre part la conception d'une cavité Fabry-Perot à très basse température dont les instabilités relatives de fréquences visées sont inférieures à 10^{-16} .

En premier lieu, le (la) candidat(e) devra s'insérer dans le projet en cours de réalisation d'un laser stabilisé en fréquence sur une cavité Fabry-Perot en silicium refroidie à 17 K (température où le coefficient d'expansion linéaire du silicium possède également un point d'inversion) par un cryogénérateur à faibles vibrations. En particulier, il (elle) participera à la mesure des performances

de ce laser par comparaison avec 2 oscillateurs saphir cryogéniques. Cette mesure consistera à générer deux fréquences micro-ondes à partir du laser stabilisé et de réaliser l'intercorrélation de ces signaux avec les deux oscillateurs saphirs cryogénique pour déterminer le bruit commun aux deux mesures correspondant au bruit du laser stabilisé.

Dans un second temps, le (la) candidat(e) devra concevoir et réaliser une cavité optique qui sera refroidi au voisinage de 100 mK par le cryogénérateur à dilution disponible au département, qui possède des fenêtres optiques et peut atteindre une température de 13 mK à vide. Pour cela, il faudra tout d'abord définir le matériau qui sera utilisé pour réaliser la cavité. Un matériau à très faible pertes mécaniques doit être privilégié. Le saphir, le quartz et le silicium seront donc naturellement envisagés. En particulier, pour le silicium les pertes mécaniques diminuent d'un facteur 100 entre 124 K et les très basses températures. De plus, le matériau choisi devra présenter un coefficient d'expansion thermique le plus faible possible, ou qui s'annule au premier ordre, pour limiter les fluctuations de longueur, et donc de fréquence, du spacer constituant la cavité. De nouveau pour le silicium celui-ci est inférieur à $4 \cdot 10^{-13} \text{ K}^{-1}$ aux très basses températures rendant la fréquence du mode de résonance de la cavité très peu sensible aux fluctuations de températures. Enfin, la limite fondamentale d'une cavité optique est le bruit thermique qui correspond au mouvement Brownien des atomes constituant la cavité. Pour réduire l'influence du bruit Brownien, les miroirs de la cavité (qui contribuent majoritairement au bruit total de la cavité optique) seront dotés d'un traitement hautement réfléchissant cristallin³ qui garantit une réduction d'un facteur 10 du bruit thermique et qui permet également l'obtention d'une très haute finesse sur le mode de résonance de la cavité. En considérant tous les aspects cités ci-dessus une stabilité relative de fréquence de $1 \cdot 10^{-17}$ peut largement être envisagée avec ce type de cavité sachant que la limite théorique est de $2 \cdot 10^{-18}$. Ce projet ouvrira donc de nouvelle perspective en termes de métrologie des fréquences et également sur la physique des résonateurs optiques à très basses température.

1 « A sub-40-mHz-linewidth laser based on a silicon single-crystal optical cavity ». T. Kessler et al. Nature Photonics, Vol. 6, pp 687-692, 2012.

2 "Silicon single crystal cryogenic optical resonator" .E. Wiens et al. Optics Letters, Vol. 39, Issue 11, pp. 3242-3245, 2014.

3 "Tenfold reduction of Brownian noise in high-reflectivity optical coatings" G.D. Cole et al. Nature Photonics, 7, 644-650, 2013