

# Fluctuations de la modulation d'amplitude résiduelle dans un EOM au niveau de $10^{-7}$

Jonathan Gillot, Santerelli Falzon Tetsing-Talla, Séverine Denis, Gwenhaël Goavec-Merou, Jacques Millo, Clément Lacroute, Yann Kersalé

Institut FEMTO-ST, ENSMM, Université de Bourgogne - Franche-Comté, 26, rue de l'Épitaphe, 25000 Besançon, France  
E-mail : [jacques.millo@femto-st.fr](mailto:jacques.millo@femto-st.fr) ; [clement.lacroute@femto-st.fr](mailto:clement.lacroute@femto-st.fr) ; [jonathan.gillot@femto-st.fr](mailto:jonathan.gillot@femto-st.fr)

Présentation sous forme de poster.

Les lasers stabilisés en fréquence sur des cavités optiques ultra-stables sont largement utilisés pour des expériences de physique fondamentale [1,2], de spectroscopie [3] ou la réalisation de références de fréquence [4]. Pour asservir la fréquence d'un laser sur celle d'un mode de cavité Fabry-Pérot, la méthode de Pound-Drever-Hall (PDH) [5] nécessite de moduler la phase du faisceau laser généralement à l'aide d'un modulateur électro-optique (EOM). Cette technique, très robuste, permet d'obtenir des lasers stabilisés présentant des stabilités de fréquences meilleures que  $\sigma_y = 10^{-16}$  [4]. L'amélioration continue de ces stabilités fait toutefois face à plusieurs défis techniques, tels que le bruit de vibrations, les fluctuations de la puissance laser ou le bruit thermique de la cavité. Parmi ces phénomènes, certains effets parasites regroupés sous le terme de modulation d'amplitude résiduelle (RAM) sont responsables de fluctuations de l'offset du signal d'erreur issu de la technique PDH et utilisé pour asservir le laser. Ces fluctuations sont donc la source d'une dégradation de la stabilité en fréquence du laser.

Plusieurs effets sont à l'origine de la RAM : un mauvais alignement de la polarisation de la lumière sur l'axe extraordinaire du cristal électro-optique [6], des interférences dans l'EOM donnant naissance à un effet étalon [7], des effets étalon dans les optiques en aval de l'EOM [8] ou certaines inhomogénéités spatiales du faisceau laser [9]. Il est possible d'atténuer la RAM de manière passive, en utilisant des cristaux avec des faces non-parallèles et d'éviter ainsi l'effet étalon [10], mais la RAM est plus efficacement supprimée en agissant sur la tension DC de l'EOM [6], la température EOM [11], ou les deux à la fois [12].

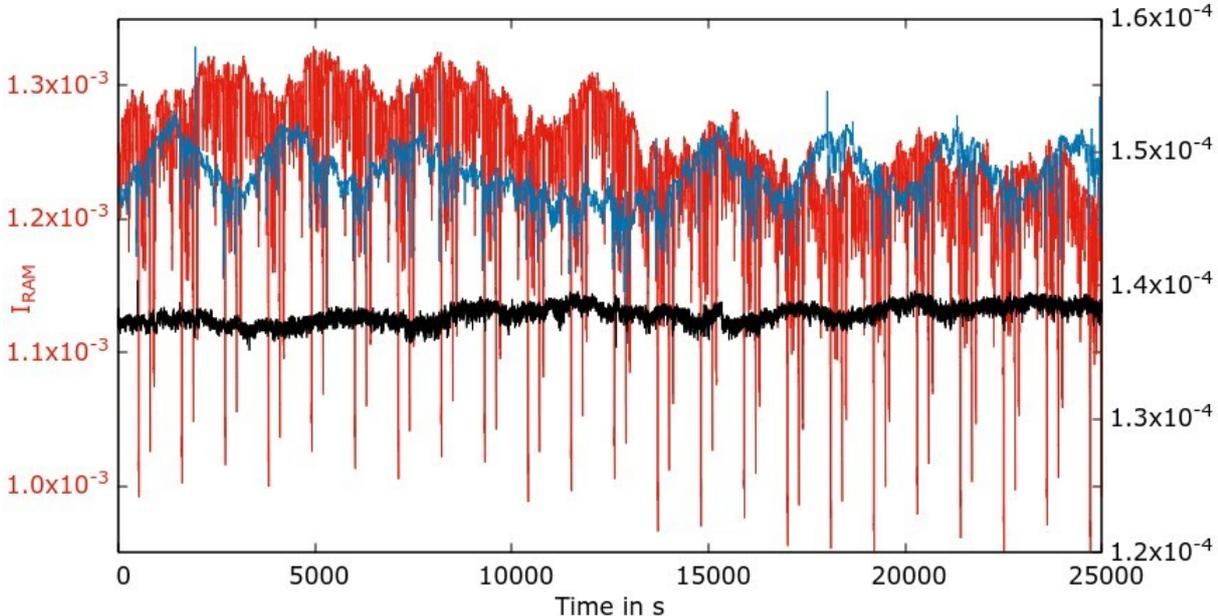


Figure 1. Evolution temporelle du signal de RAM lorsque la régulation de température de l'EOM est activée. En rouge et bleu (échelle de gauche), la boucle d'asservissement DC pour contrôler la RAM est désactivée, respectivement sans et avec stabilisation de puissance optique. En noir (échelle de droite), le contrôle RAM (tension DC) est activé, l'échelle de droite est agrandie un facteur  $\approx 10$ .

Dans cette communication, nous présentons une amélioration de l'état de l'art de la réduction de la modulation d'amplitude résiduelle (RAM). Jusqu'à présent, les plus basses fluctuations de la RAM observées atteignaient  $\sigma_M \approx 10^{-6}$  (écart type d'Allan) dans un cristal en espace libre [12], ou environ  $\sigma_M \approx 10^{-7}$  sur un temps d'intégration assez court ( $\sim 300$  s) dans un EOM fibré [13]. Avec notre montage expérimental, nous parvenons à améliorer les fluctuations de la RAM au niveau de  $\sigma_M = 1,4 \times 10^{-7}$  avec un EOM en espace libre, et à les conserver en dessous de  $\sigma_M \approx 10^{-6}$  pour un temps d'intégration d'une heure.

La méthode utilisée pour annuler la RAM repose sur une stabilisation précise de la température de l'EOM (à  $\pm 20$  mK près), une stabilisation de la puissance laser et un contrôle de la tension continue appliquée sur l'EOM. La température est choisie de telle façon à obtenir un niveau moyen de RAM proche de zéro, et la boucle de correction sur la tension DC effectue des corrections rapides afin de réduire fortement les fluctuations. De plus, l'électronique utilisée est entièrement numérique, et nous nous servons de trois FPGA régulant chacun une boucle d'asservissement. L'électronique numérique permet de régler finement les paramètres du proportionnel intégrateur, assure la répétabilité des résultats et évite l'hystérésis et la non-linéarité. À partir des fluctuations de RAM  $\sigma_M$ , on peut déterminer l'instabilité en fréquence propre à la RAM  $\sigma_y^{RAM}(\tau)$  avec l'équation (1) :

$$\sigma_y^{RAM} = \frac{1}{4} \frac{J_1(\beta_z)}{J_0(\beta_z)} \frac{\Delta v_c}{v_c} \sigma_M \quad (1)$$

où  $J_0(\beta_z)$  et  $J_1(\beta_z)$  sont les fonctions de Bessel d'ordre 0 et 1,  $\Delta v_c$  et  $v_c$  sont respectivement la largeur à mi-hauteur et la fréquence du laser.

Ainsi, pour une cavité ultra-stable de 14,5 cm de long disposant d'une finesse typique de 250 000, on peut déterminer grâce à l'équation (1) que des fluctuations de RAM réduites à  $\sigma_M = 1,4 \times 10^{-7}$  permettent d'obtenir une stabilité de fréquence de  $\sigma_y^{RAM}(\tau) = 5 \times 10^{-19}$ . Cette instabilité en fréquence propre à la RAM est bien en dessous de la limite imposée par le bruit thermique à  $3 \times 10^{-17}$ , et cela pour des temps d'intégrations jusqu'à 10 000 s.

#### Références :

- [1] T. L. S. Collaboration, the Virgo Collaboration, the KAGRA Collaboration, B. P. Abbott, R. Abbott, T. D. Abbott, S. Abraham, F. Acernese, K. Ackley, C. Adams, et al., Living Rev Relativ 23, 3 (2020).
- [2] H. Müller, S. Herrmann, A. Saenz, A. Peters, and C. Lämmerzahl, Phys. Rev. D 68, 116006 (2003).
- [3] J. Ye, L.-S. Ma, and J. L. Hall, J. Opt. Soc. Am. B 15, 6 (1998).
- [4] W. Zhang, J. M. Robinson, L. Sonderhouse, E. Oelker, C. Benko, J. L. Hall, et al., Phys. Rev. Lett. 119, 243601 (2017).
- [5] R. W. P. Drever, J. L. Hall, F. V. Kowalski, J. Hough, G. M. Ford, A. J. Munley, and H. Ward, Appl. Phys. B 31, 97 (1983).
- [6] N. C. Wong and J. L. Hall, J. Opt. Soc. Am. B 2, 1527 (1985).
- [7] E. A. Whittaker, M. Gehrtz, and G. C. Bjorklund, J. Opt. Soc. Am. B, JOSAB 2, 1320 (1985).
- [8] H. Shen, L. Li, J. Bi, J. Wang, and L. Chen, Phys. Rev. A 92, 063809 (2015).
- [9] J. Sathian and E. Jaatinen, Opt. Express 21, 12309 (2013).
- [10] Z. Li, W. Ma, W. Yang, Y. Wang, and Y. Zheng, Optics Letters 41, 3331 (2016).
- [11] L. Li, F. Liu, C. Wang, and L. Chen, Review of Scientific Instruments 83, 043111 (2012).
- [12] W. Zhang, M. J. Martin, C. Benko, J. L. Hall, J. Ye, C. Hagemann, T. Legero, U. Sterr, F. Riehle, G. D. Cole, et al., Opt. Lett. 39, 1980 (2014).
- [13] M. Descampeaux, G. Feugnet, and F. Bretenaker, Opt. Express 29, 36211 (2021).