

Mesure du bruit de phase d'un amplificateur optique

Damien Teyssieux, Martin Callejo, Jacques Millo, Enrico Rubiola et Rodolphe Boudot
FEMTO-ST, CNRS, Supmicrotech, Université Marie et Louis Pasteur, 26 chemin de l'épitahe 25030 Besançon
Contact: damien.teyssieux@femto-st.fr

Les amplificateurs optiques, incluant les amplificateurs à semi-conducteurs (SOA), les amplificateurs à fibres dopées à l'erbium (EDFA) et les amplificateurs Raman (FRA), sont des éléments essentiels des réseaux de télécommunications en fibre optique. Ils compensent les pertes en transmission sur de longues distances, tout en visant à préserver la pureté du signal initial. Leur usage s'est intensifié avec l'essor des centres de données, des réseaux Ethernet et des infrastructures de téléphonie mobile. Au-delà des télécommunications, les amplificateurs optiques jouent un rôle crucial dans la génération et la distribution de signaux optiques ultra-stables et à faible bruit de phase, notamment pour la comparaison des horloges atomiques optiques de pointe. Ces dispositifs, atteignant des stabilités relatives de fréquence inférieures à 10^{-16} à 1 s, reposent sur des lasers stabilisés sur cavités Fabry-Perot [1-3] et sont comparés via des liens optiques longue distance nécessitant l'emploi d'amplificateurs optiques. Aussi, ces dernières années ont vu l'émergence d'horloges ou références optiques miniatures à cellule de vapeur [4-5], atteignant des stabilités relatives de fréquence dans la gamme basse des 10^{-13} à 1 s. Les contributions majeures à la stabilité de fréquence court-terme de ces références sont le bruit de grenaille photon, ainsi que le bruit de fréquence du laser interrogateur par un phénomène dit d'intermodulation [6]. Ces applications sont donc aussi en recherche de signaux optiques couplant puissance et haute pureté spectrale, confirmant l'intérêt d'amplificateurs optiques.

Le bruit de phase dans les amplificateurs RF et micro-ondes a été étudié [7,8]. Concernant les amplificateurs optiques, les études expérimentales existantes se sont généralement focalisées sur l'impact de l'amplificateur sur le bruit de phase de signaux micro-ondes transportés optiquement [9], plutôt que sur le bruit de phase optique lui-même. D'autres études ont montré, pour certaines applications, que l'utilisation d'un amplificateur optique ne dégradait pas le bruit de phase ou RIN du signal optique initial [10], sans pour autant rapporter le bruit de phase de l'amplificateur. Ainsi, avec surprise, nous n'avons pas trouvé dans la littérature de mesure directe du bruit de phase d'un amplificateur optique, dans le domaine optique. L'objectif de ce travail est ainsi de contribuer à combler ce manque en présentant des mesures du bruit de phase d'un SOA.

Les mesures de bruit de phase de l'amplificateur ont été réalisées à $1.5 \mu\text{m}$ à l'aide d'une technique d'interférométrie hétérodyne retardée (DSHI) [11-12], dont le schéma est présenté en figure 1.

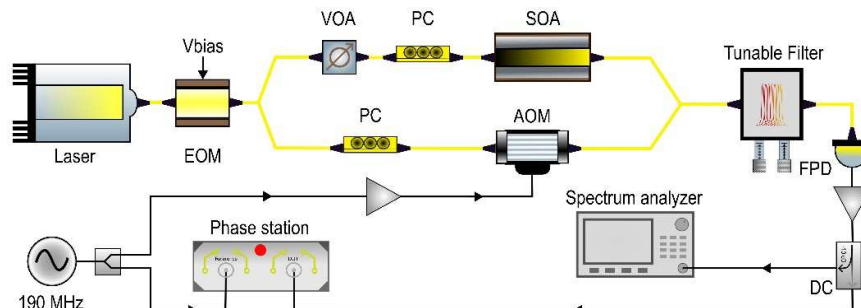


Figure 1. Montage expérimental utilisé pour les mesures du bruit de phase du laser et du SOA.

La figure 2 montre les mesures du bruit de phase du laser, du banc sans SOA, et du banc avec le SOA. Le bruit de phase du laser suit une loi en $1/f^4$, caractéristique d'une instabilité thermique, et reste

nettement supérieur au bruit du banc jusqu'à 1 MHz. Entre 4 Hz et 1 kHz, le bruit de phase mesuré du SOA est limité par celui du banc de mesure.

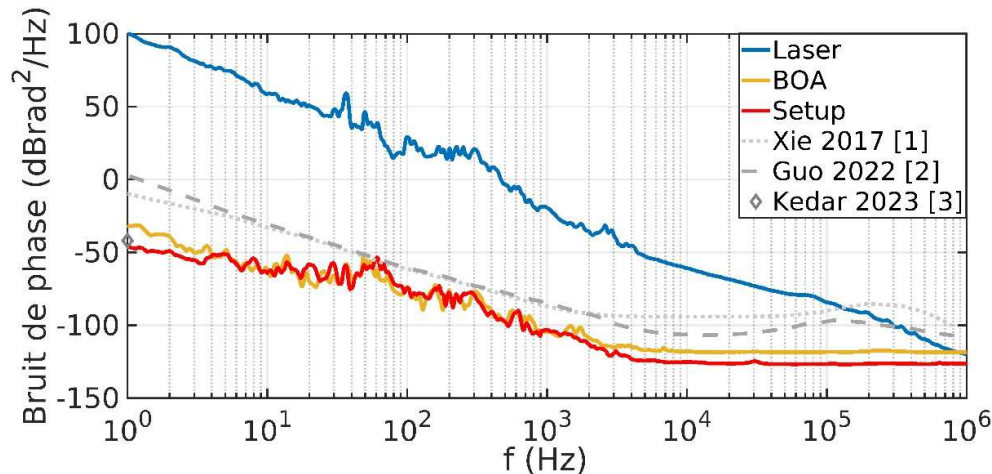


Figure 2. Bruit de phase du laser, du montage sans le SOA, et du montage en présence du SOA.

Le bruit de phase du SOA à 1 Hz est mesuré inférieur à -32 dBrad²/Hz, correspondant à une stabilité relative de $5,2 \times 10^{-17}$ à 1 seconde [13], meilleure que celle de nombreux lasers à cavité Fabry-Perot stabilisés. À haute fréquence (~ 100 kHz), le SOA introduit un bruit blanc supplémentaire (~ 12 dB au-dessus du banc), tout en maintenant un niveau de bruit inférieur à -115 dBrad²/Hz, pouvant atteindre -125 dBrad²/Hz, niveaux en deçà d'une majorité du bruit de lasers à haute pureté spectrale.

Nous avons mesuré que le plancher de bruit de phase du SOA à 1 MHz diminue avec l'augmentation de la puissance RF détectée, avant de se stabiliser. Une hausse de la puissance optique en entrée (P_i) réduit également le bruit de phase. Les données expérimentales, ajustées par un modèle théorique, permettent d'extraire les valeurs du plancher de bruit de phase du SOA. Nous avons aussi mesuré que le plancher de bruit de phase de l'amplificateur décroît avec l'augmentation de P_i , indépendamment du courant d'injection ($I = 150, 350, 600$ mA), suggérant que le plancher de bruit de phase du SOA n'est pas lié à son gain. Les études se poursuivent et les résultats les plus récents seront présentés à la conférence.

Références :

- [1] X. Xie et al., Opt. Lett. 42, 7, 1217-1220 (2017).
- [2] J. Guo et al., Sci. Adv. 8, eabp9006 (2022).
- [3] D. Kedar et al., Optica 10, 4, 464-470 (2023).
- [4] Z. Newman et al., Opt. Lett. 46, 18, 4702 (2021).
- [5] E. Klinger et al., Appl. Phys. Lett. 126, 124003 (2025).
- [6] C. Audoin et al., IEEE Trans. Instr. Meas. 40, 2, 121 (1991).
- [7] R. Boudot et E. Rubiola, IEEE Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr. 59, 12, 2613 (2012).
- [8] S. Gribaldo et al., 19th European Frequency Time Forum, pp. 343-347 (2005).
- [9] D. Eliyahu et al., IEEE Microw. Theo. Tech. 56, 2, 449 (2008).
- [10] Q. Zhao et al., Opt. Exp. 31, 12, 18734 (2023).
- [11] T. Okoshi et al., Elec. Lett. 16, 16, 630 (1980).
- [12] O. Llopis et al., Opt. Lett. 36, 14, 2713 (2011).
- [13] E. Rubiola et F. Vernotte, IEEE Trans. Microw. Theo. Tech. 71, 7, 2996 (2023).