

## Influence de l'amplificateur optique dans un oscillateur optoélectronique à gain optique

Guillaume Dangoisse<sup>1</sup>, Perrine Berger<sup>1</sup>, Frederic Van Dijk<sup>2</sup>, Christophe Caillaud<sup>2</sup>, Michaël Verdun<sup>3</sup>, Nadège Le Grand<sup>3</sup>, Xavier Prat<sup>3</sup>, Guillaume Canat<sup>3</sup>, et Vincent Crozatier<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Thales Research and Technology, 1 Avenue Augustin Fresnel, 91767 Palaiseau, France

<sup>2</sup> III-V Lab, 1 Avenue Augustin Fresnel, 91767 Palaiseau, France

<sup>3</sup> Keopsys Industries, Lumibird, 2 Rue Paul Sabatier, 22300 Lannion, France

En un peu plus de 20 ans, les oscillateurs optoélectroniques (OEO) sont devenus une alternative aux oscillateurs à quartz pour fournir des références de fréquence GHz à très bas bruit de phase [1]. En principe, le bruit de phase d'un OEO dépend de la longueur de fibre optique implémentée, mais pas de la fréquence d'oscillation. Pour compenser les pertes du résonateur passif, on utilise généralement un amplificateur RF, dont le bruit de phase additif peut se révéler être la principale limite des performances [2]. Ainsi, il est délicat de maintenir un très bas bruit de phase au-delà de la bande X, faute d'amplificateurs adaptés. Pour contourner ce problème, une solution consiste à utiliser un amplificateur optique [3]. Si quelques démonstrations expérimentales ont été publiées dans la littérature, aucune étude de l'impact de l'amplificateur sur le bruit de phase n'a été menée à notre connaissance. Nous présentons ici des premiers résultats sur l'analyse du bruit de phase d'un OEO à gain optique, en fonction de deux amplificateurs différents. Nous montrons en particulier que le bruit d'intensité relatif (RIN) apporté par l'amplificateur est la principale contribution au bruit de phase. Nous montrons également que le bruit de phase de l'OEO reste équivalent entre 8 GHz et 15 GHz.

Le schéma expérimental de notre OEO est donné sur la figure 1. Il contient une source laser DFB à semi-conducteur émettant 100 mW à 1,55  $\mu\text{m}$ . L'oscillation RF est portée dans le domaine optique par un modulateur d'intensité de type Mach-Zehnder (MZM), avant d'être amplifiée par l'amplificateur optique et de se propager dans 1 km de fibre optique monomode standard. Deux amplificateurs ont été utilisés : un amplificateur à fibre dopée Erbium (EDFA) de haute puissance couvrant les bandes C et L, et un amplificateur à semi-conducteur (SOA). La conversion optique/électronique est réalisée par une photodiode UTC (uni-travelling carrier) développée par le III-V Lab [4], mise en boîtier par Lumibird. Enfin, la fréquence d'oscillation est déterminée par un filtre RF passe bande à large Q. Un coupleur RF 10 dB permet d'extraire le signal RF. Dans toutes les configurations testées, le photocourant est maintenu à 40 mA grâce à un atténuateur optique placé devant la photodiode. La sensibilité de la photodiode est de 1 A/W. A ce photocourant, l'OEO oscille à 10 GHz, et on peut en mesurer le bruit de phase avec un analyseur FSWP 26 de Rhode & Schwarz.

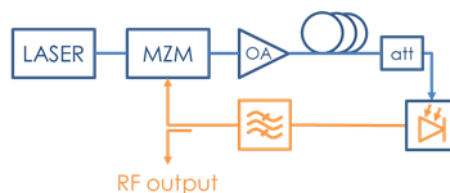


Figure 1. Schéma de l'OEO. MZM : modulateur de Mach-Zehnder, OA : amplificateur optique.

Dans un premier temps, nous avons utilisé l'EDFA, dans deux configurations de pompage : à faible pompage, l'EDFA sature à 40 mW ; à fort pompage, l'EDFA sature à 500 mW. Les densités spectrales de puissance de bruit de phase mesurées dans les deux configurations sont présentées sur la figure 2. Dans les deux cas, on observe un excès de bruit entre 100 Hz et 10 kHz, puis un niveau plancher atteint autour de 100 kHz, avant de retrouver les remontées de bruit caractéristiques des OEOs en simple boucle. Le bruit de phase est plus élevé lorsque l'EDFA est faiblement pompé (trace bleue). Dans les deux cas, les performances de bruit de phase sont dégradées par rapport à un OEO à gain RF réalisé avec les mêmes composants [2].

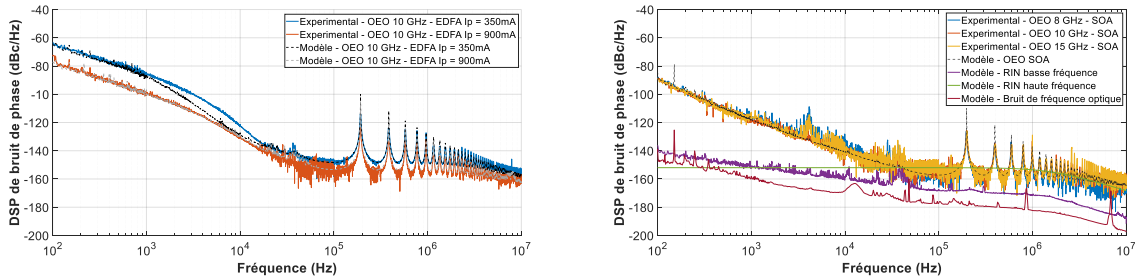


Figure 2. Bruits de phase mesurés et simulés à 10 GHz pour un OEO avec EDFA (gauche) et SOA (droite)

Nous avons mesuré le bruit d'intensité optique en bande de base et à 10 GHz (voir figure 3). Dans le premier cas, les mesures ont été réalisées avec un photodiode PIN éclairée à 15 mW. L'amplificateur est injecté par le DFB à 1 mW. A titre de comparaison, nous présentons également le RIN du DFB seul. Le RIN en sortie d'EDFA présente la bosse observée sur le bruit de phase. On peut injecter ces profils de RIN dans un modèle de bruit de phase [2]. On obtient alors les traces en pointillé de la figure 2 en considérant une conversion de bruit d'intensité optique en bruit de phase RF au niveau de la photodiode par un coefficient de l'ordre de 0.8 rad pour les deux conditions de fonctionnement de l'EDFA. De plus, le bruit de phase au-delà de 100 kHz peut être ajusté par un excès de RIN à 10 GHz de 17 dB pour l'EDFA faiblement pompé et 12 dB pour un EDFA fortement pompé. Ces valeurs sont cohérentes avec des mesures d'excès de RIN à 10 GHz présentées sur la figure 3, pour une puissance d'injection de l'ordre de 1 mW, ce qui correspond aux conditions typiques dans l'OEO.

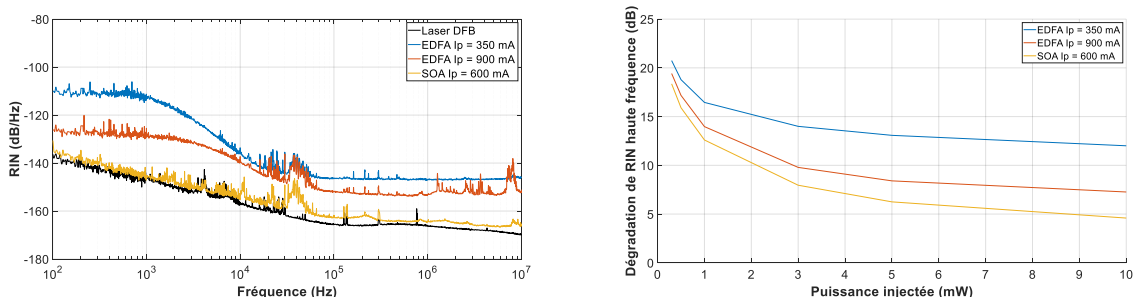


Figure 3. RIN en bande de base (gauche), et excès de RIN par rapport au DFB seul à 10 GHz (droite)

Nous avons repris cette méthodologie avec le SOA, polarisé à un courant de 600 mA (voir figure 2). On constate que le bruit de phase est nettement meilleur qu'avec l'EDFA, en cohérence avec les mesures de RIN. Le modèle reproduit parfaitement les mesures pour un coefficient de conversion sur la photodiode ajusté à 0,75 rad, et excès de RIN de 8 dB à 10 GHz. Malgré tout, les performances restent limitées par le bruit d'intensité optique. Il est cependant intéressant de noter que des mesures de bruit de phase réalisées à 8 GHz et 15 GHz présentent les mêmes niveaux qu'à 10 GHz. Cette observation est cohérente avec une limitation par le RIN.

Ces travaux permettent de mieux comprendre les facteurs limitant pour la réalisation d'OEO à gain optique, et ouvrent des perspectives pour la montée en fréquence d'OEO, indépendamment des performances et disponibilités des amplificateurs RF.

#### Références :

- [1] X. S. Yao and L. Maleki, "Converting light into spectrally pure microwave oscillation," *Opt. Lett.*, vol. 21, pp.483–485, 1996.
- [2] O. Lelièvre, et al., "A model for designing ultralow noise single- and dual-Loop 10-GHz optoelectronic oscillators," *J. Lightw. Technol.*, vol. 35, pp. 4366–4374, 2017.
- [3] P. S. Devgan, et al., "Improvement in the phase noise of a 10 GHz optoelectronic oscillator using all-photonic gain", *J. Lightw. Technol.*, vol. 27, p. 3189-3193, 2009.
- [4] M. Chtioui, et al., "High responsivity and high power UTC and MUTC GaInAs-InP photodiodes," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 24, pp. 318-320, 2012.