



**HAL**  
open science

## **Etude du bruit de phase RF des amplificateurs optiques ; application aux oscillateurs optoélectroniques couplés**

Vincent Auroux, Arnaud Fernandez, Olivier Llopis, Patrick Beure d'Augères,  
Alexandre Vouzellaud

### ► **To cite this version:**

Vincent Auroux, Arnaud Fernandez, Olivier Llopis, Patrick Beure d'Augères, Alexandre Vouzellaud. Etude du bruit de phase RF des amplificateurs optiques ; application aux oscillateurs optoélectroniques couplés. Journées Nationales Microonde, Jun 2015, Bordeaux, France. hal-01164629

**HAL Id: hal-01164629**

**<https://hal.science/hal-01164629v1>**

Submitted on 17 Jun 2015

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## Etude du bruit de phase RF des amplificateurs optiques ; application aux oscillateurs optoélectroniques couplés

Vincent Auroux<sup>1,2,3</sup>, Arnaud Fernandez<sup>2,3</sup>, Olivier Llopis<sup>2</sup>, Patrick Beure d'Augères<sup>1</sup>, Alexandre Vouzellaud<sup>1</sup>

<sup>1</sup>OSAT, 16 avenue Didier Daurat, 31400 Toulouse

<sup>2</sup>CNRS, LAAS, Univ. de Toulouse, 7 avenue colonel Roche, 31031 Toulouse

<sup>3</sup>Univ. de Toulouse, UPS, 31400 Toulouse  
vauroux@laas.fr

### Résumé

Dans ce travail, des mesures de bruit de phase de deux amplificateurs de technologies différentes (semi-conducteur et fibrée) sont présentées et des méthodes de réduction de celui-ci sont explorées. Une réduction importante du bruit de phase jusqu'à 15 dB est démontrée. Une intégration d'un amplificateur à semi-conducteur dans un oscillateur optoélectronique couplé à 10.2 GHz est réalisée et le bruit de phase du système est présenté et comparé à l'état de l'art. L'oscillateur possède une bonne stabilité et un niveau de bruit de phase de  $-132$  dBc/Hz à 10 kHz de la porteuse a été obtenu.

### 1. Introduction

Le développement de systèmes de télécommunications ou de détection radar performants a accru la nécessité de signaux hautes fréquences à haute pureté spectrale. Ces références de fréquence peuvent être obtenues à partir de la multiplication de fréquence de systèmes très stables, comme les sources à quartz. La montée à très haute fréquence de ces systèmes limite cette technique et ouvre la voie à la génération microonde par l'optique. Des signaux très purs sont alors issus de battements d'au moins deux fréquences optiques. Les dispositifs les plus couramment utilisés sont les oscillateurs optoélectroniques (OEO)[1]. La pureté spectrale de ces systèmes provient de l'utilisation de résonateurs optiques passifs à très fort coefficient de qualité, ou de longues lignes à retard (plusieurs kilomètres)[2]. Une deuxième approche possible réside dans l'utilisation d'un résonateur actif : il s'agit dans ce cas d'un oscillateur optoélectronique couplé (COEO) [3]. Ce système génère un peigne de fréquences dans le domaine optique, où l'amplificateur optique se trouve au cœur du dispositif. e. au sein même de la cavité résonante optique. Dans le dispositif que nous avons mis en œuvre, ce composant doit présenter un fort gain petit signal et une puissance de saturation importante, tout en conservant un bruit de phase minimal.

Il est donc essentiel d'étudier des méthodes pour réduire la contribution en bruit de l'amplificateur dans le dispositif. L'objectif de notre étude est tout d'abord de

comparer les amplificateurs à semi-conducteurs et à fibre, afin de trouver la meilleure technologie pour cette application, ainsi que les conditions optimales d'utilisation du composant. Dans un deuxième temps, l'intégration de l'amplificateur au COEO et son impact sur les performances de l'oscillateur seront présentés.

### 2. Comparaison SOA/EDFA

#### 2.a. Dispositif expérimental

Deux amplificateurs ont été étudiés : un SOA à forte puissance de saturation et un EDFA commercial, dont les caractéristiques respectives sont reportées dans le Tableau 1.

	SOA	EDFA
Gain petit signal	28 dB	33 dB
Puissance saturation	16 dBm	20 dBm

Tableau 1 : Paramètres des amplificateurs optiques

Pour l'étude, une mesure du bruit de phase résiduel des amplificateurs dans une liaison optique pour différentes conditions de saturation a été effectuée. Un oscillateur à résonateur diélectrique à 3,5 GHz, présentant un faible bruit de phase et d'amplitude, a été utilisé dans un montage à détection de phase par corrélation déjà détaillé en [4] et représenté Figure 1. Une mesure de bruit d'amplitude optique basse fréquence a également été mise en œuvre.

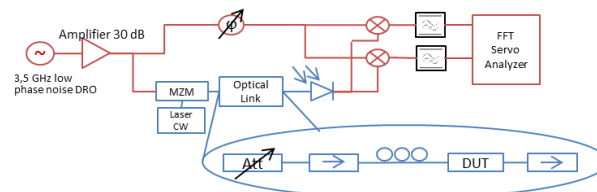


Figure 1 : Montage expérimental pour la mesure de bruit de phase résiduel à 3,5 GHz

#### 2.b. Résultats

Les résultats de mesures de bruit de phase résiduel sont présentés sur la Figure 2. Il a été mis en évidence l'importance de la saturation de l'amplificateur.

En effet, la saturation du gain entraîne l'augmentation du rapport signal à bruit et donc une diminution du plancher de bruit de phase. Par ailleurs, l'EDFA présente une remontée importante du bruit de phase proche de la porteuse. Nous avons donc réalisé des mesures de bruit d'amplitude à basse fréquence pour chacun des amplificateurs. Les résultats de ces mesures pour l'EDFA sont présentés sur la Figure 3.

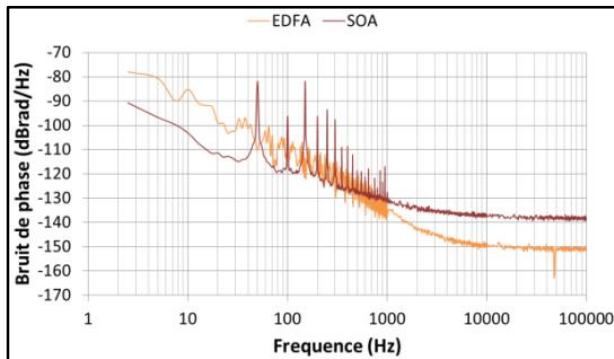


Figure 2 : Bruit de phase résiduel à 3.5 GHz d'une liaison optique incluant un EDFA et un SOA saturés

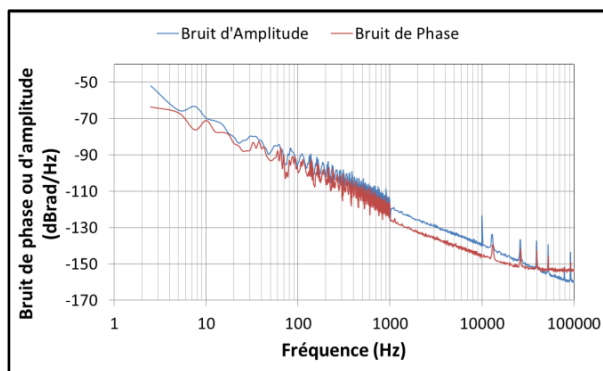


Figure 3 : Bruit d'amplitude à basse fréquence et bruit de phase ajouté à une porteuse à 3.5 GHz pour le cas de l'EDFA

La similitude du bruit d'amplitude et de phase pour l'EDFA justifie un phénomène de conversion amplitude-phase au niveau de la photodiode. Il a été préalablement montré qu'en ajustant la puissance optique sur la photodiode, on peut minimiser cette conversion [5]. Avec cette approche, nous avons effectivement pu atteindre une réduction de 15 dB du bruit de phase pour l'EDFA [6].

En résumé en ce qui concerne les deux amplificateurs testés, le SOA présente un bruit en  $1/f$  proche de la porteuse inférieur au bruit de l'EDFA. Au contraire, l'EDFA possédant un facteur de bruit plus faible permet d'atteindre un plancher de bruit de phase de 12 dB inférieur à celui du SOA loin de la porteuse. Il y a donc un compromis à réaliser selon la stabilité du dispositif demandé. Nous avons finalement choisi le SOA pour la réalisation de notre COEO, en nous basant sur sa compacité et son faible niveau de bruit en  $1/f$ .

### 3. L'oscillateur optoélectronique couplé

#### 3.a. Structure et fonctionnement du COEO

L'architecture conventionnelle d'un COEO est représentée sur la Figure 4. Le dispositif est similaire aux lasers à blocage de modes régénératif [7] à ceci près que le système génère un train d'impulsions optiques sur une sortie et un signal radiofréquence stable sur une seconde sortie. Le résonateur optique actif utilisé dans ces travaux est un laser à blocage de mode constitué d'un SOA et d'un modulateur d'amplitude de type Mach Zehnder (MZM). Un retard fibré est également inséré dans la boucle pour augmenter le facteur qualité du résonateur.

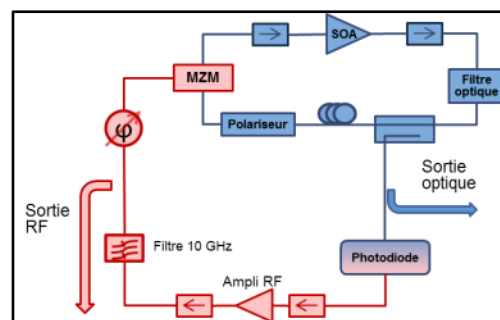


Figure 4 : Topologie du COEO réalisé

Le peigne de fréquences optiques généré par le laser à blocage de mode est photo-détecté et le signal résultant est amplifié, filtré et réinjecté dans le MZM. Enfin, un déphaseur permet le couplage entre l'oscillation optique et l'oscillation optoélectronique. Les spectres radiofréquence et optique générés sont reportés sur la Figure 5. Une réjection des modes latéraux supérieure à 70 dB est obtenue pour le spectre RF. D'autre part, le spectre optique du train d'impulsions stabilisées est fortement marqué par les non-linéarités induites par le SOA en régime de saturation [8]. Ces non-linéarités sont à l'origine de la distorsion, de l'élargissement et du décalage vers les basses fréquences « red shift » du spectre optique. L'auto-modulation de phase induite par le SOA affecte aussi les impulsions par un front montant abrupt et un front descendant plus long.

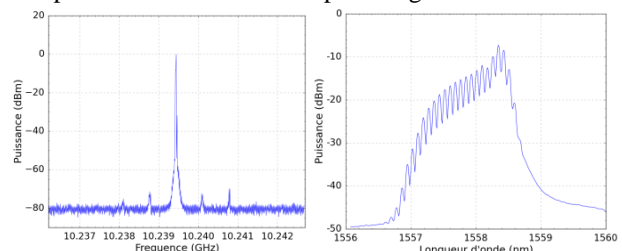


Figure 5 : Spectre RF (à gauche) et spectre optique (à droite) mesurés en sortie du COEO

#### 3.b. Bruit de phase du COEO

Le bruit de phase des oscillateurs optoélectroniques est majoritairement limité par les éléments actifs du système, donc les amplificateurs, à la fois RF et optique. Ainsi, les contributions en bruit de phase de chaque amplificateur en boucle ouverte  $S_\varphi$  ont été cumulées et la contribution totale en bruit de phase en boucle fermée  $L_\varphi$  a été obtenue par la formule de Leeson [9] :

$$L_{\varphi}(f_m) = 10 \cdot \log \left( \left( \frac{f_{osc}^2}{8 \cdot Q_{RF}^2 \cdot f_m^2} + 1 \right) \cdot S_{\varphi}(f_m) \right)$$

Avec  $f_m$  la fréquence de modulation,  $Q_{RF}$  le facteur de qualité du résonateur et  $f_{osc}$  la fréquence d'oscillation.

Les performances du COEO réalisé au laboratoire (Figure 6) ont été mesurées sur un analyseur de signal Agilent E5052 et sont reportées sur la Figure 7. La contribution totale en bruit de phase pour l'ensemble des éléments actifs du système est représentée sur la Figure 7.

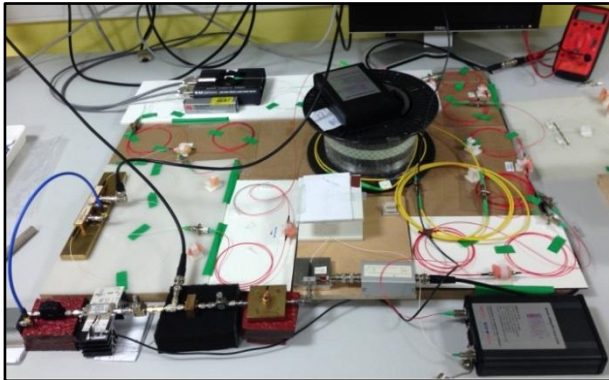


Figure 6 : COEO réalisé au laboratoire

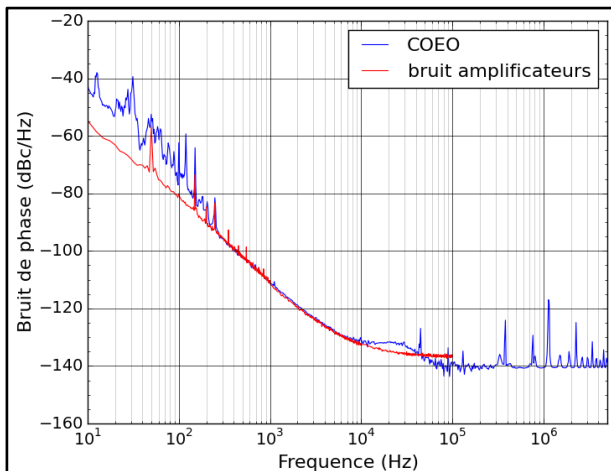


Figure 7 : Bruit de phase du COEO à 10.2 GHz

Un bruit de phase de  $-132$  dBc/Hz a été obtenu à  $10$  kHz de la porteuse. Un second filtrage a lieu à  $30$  kHz de la porteuse, dû à la dynamique du système. On constate néanmoins que le bruit de phase de  $100$  Hz à  $10$  kHz de la porteuse est limité par l'amplification dans le système. Il est donc essentiel de réduire la contribution en bruit des amplificateurs optiques sur cette plage de fréquences. Une première approche possible est la réduction des pertes intra cavité afin d'augmenter la saturation du SOA et donc de diminuer le plancher de bruit. Il est également possible de travailler sur l'amplification fibrée, l'EDFA possédant un meilleur plancher de bruit, en réduisant son bruit  $1/f$ . Le plancher de bruit au-delà de  $100$  kHz de la porteuse à  $-140$  dBc/Hz s'explique par le faible rapport signal à bruit au niveau de la photodiode dû au couplage  $10:90$  au niveau de la sortie optique. Enfin, les vibrations

mécaniques semblent limiter la performance très près de la porteuse ( $10$  Hz- $100$  Hz), mais il faut noter qu'aucune précaution particulière n'a été prise pour le moment pour limiter ce phénomène (en particulier, le système n'est pas posé sur une table anti-vibrations).

Par ailleurs, un COEO construit à partir d'un EDFA a aussi été réalisé au laboratoire, mais les oscillations de relaxation de l'erbium ([10],[11]) qui interviennent à quelques dizaines de kHz créent une remontée importante du bruit de phase.

### 3.c. Comparaison à l'état de l'art

La recherche de sources à haute pureté spectrale à haute fréquence a engendrée de nombreuses architectures innovantes notamment dans le domaine des oscillateurs optoélectroniques couplés. Une topologie fibrée très performante a été développée [12], permettant d'atteindre un record à  $-145$  dBc/Hz à  $10$  kHz de la porteuse. Une architecture n'utilisant aucun amplificateur RF a même été proposée [13] afin de s'affranchir de la limitation par le bruit de phase de ce dernier. Certains travaux ont également été menés sur les amplificateurs à semi-conducteurs afin d'augmenter leur puissance de saturation et ainsi diminuer le plancher de bruit. Un COEO construit autour d'un tel SOA a été réalisé [14]. La Figure 8 présente le bruit de phase pour ces différentes architectures de COEO à  $10$  GHz. Le COEO que nous avons réalisé présente un bruit de phase similaire aux autres architectures mais il reste limité par le bruit de l'amplificateur RF ainsi que du SOA. Une amélioration du bruit de phase des éléments actifs de l'oscillateur devrait engendrer une réduction significative du bruit de phase du système.

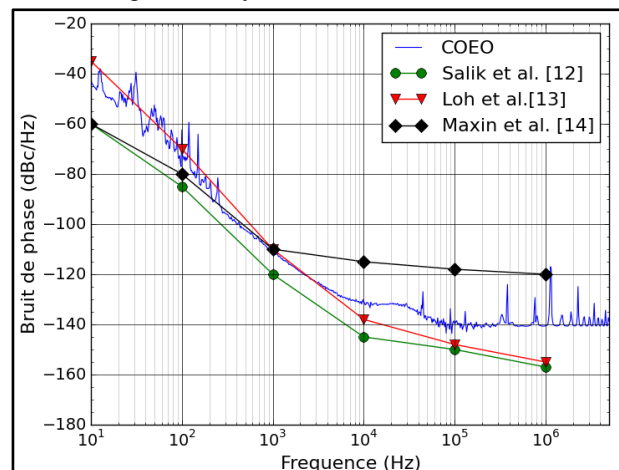


Figure 8 : Bruit de phase de différents COEO à 10 GHz

## 4. Conclusion

Le bruit de phase RF de deux amplificateurs optiques a été mesuré et étudié. Une conversion amplitude-phase a été mise en évidence et une réduction de  $15$  dB du bruit de phase a été obtenue en ajustant la puissance optique sur la photodiode. Le SOA testé présentait un bruit de phase proche de la porteuse meilleur que celui de l'EDFA (l'amplificateur à fibre ayant néanmoins un meilleur plancher de bruit loin de la porteuse). Dans le cadre de nos applications, nous avons privilégié le bruit

proche de la porteuse et réalisé le COEO à partir du SOA. Un oscillateur optique-RF couplé, avec une sortie RF à 10 GHz, a pu être obtenu. Ce COEO présente une bonne stabilité et un niveau de bruit de phase de  $-132$  dBc/Hz à 10 kHz de la porteuse. Ces performances sont limitées par le bruit de phase des éléments actifs du système et des perspectives d'améliorations vont être étudiées. Les résultats ont enfin été comparés à l'état de l'art.

## 5. Bibliographie

- [1] L. Maleki, « The opto-electronic oscillator (OEO): Review and recent progress », in *European Frequency and Time Forum (EFTF)*, 2012, 2012, p. 497-500.
- [2] D. Eliyahu, D. Seidel, et L. Maleki, « Phase noise of a high performance OEO and an ultra low noise floor cross-correlation microwave photonic homodyne system », in *Frequency Control Symposium, 2008 IEEE International*, 2008, p. 811-814.
- [3] X. S. Yao et L. Maleki, « Dual microwave and optical oscillator », *Opt. Lett.*, vol. 22, n° 24, p. 1867-1869, 1997.
- [4] G. Cibiel, M. Régis, E. Tournier, et O. Llopis, « AM noise impact on low level phase noise measurements », *Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control IEEE Trans. On*, vol. 49, n° 6, p. 784-788, 2002.
- [5] Z. Abdallah, A. Rumeau, J. Maxin, A. Fernandez, L. Morvan, O. Llopis, et G. Cibiel, « Photodiode nonlinear modeling and its impact on optical links phase noise », *EFTF proceeding*, 2014.
- [6] V. Auroux, A. Fernandez, O. Llopis, P.-H. Merrer, A. Vouzelaud, et others, « Microwave phase noise properties of optical links involving small signal and gain saturated optical amplifiers », in *European Frequency and Time Forum*, 2014.
- [7] G. R. Huggett, « Mode-locking of CW lasers by regenerative RF feedback », *Appl. Phys. Lett.*, vol. 13, n° 5, p. 186-187, sept. 1968.
- [8] G. P. Agrawal et N. A. Olsson, « Self-phase modulation and spectral broadening of optical pulses in semiconductor laser amplifiers », *Quantum Electron. IEEE J. Of*, vol. 25, n° 11, p. 2297-2306, 1989.
- [9] D. B. Leeson, « A simple model of feedback oscillator noise spectrum », *Proc. IEEE*, vol. 54, n° 2, p. 329-330, 1966.
- [10] H. L. An, E. Y. B. Pun, X. Z. Lin, et H. D. Liu, « Effects of ion-clusters on the intensity noise of heavily erbium-doped fiber lasers », *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 11, n° 7, p. 803-805, juill. 1999.
- [11] F. Sanchez, P. Le Boudec, P.-L. François, et G. Stephan, « Effects of ion pairs on the dynamics of erbium-doped fiber lasers », *Phys. Rev. A*, vol. 48, n° 3, p. 2220, 1993.
- [12] E. Salik, N. Yu, et L. Maleki, « An Ultralow Phase Noise Coupled Optoelectronic Oscillator », *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 19, n° 6, p. 444-446, 2007.
- [13] W. Loh, S. Yegnanarayanan, J. J. Plant, F. J. O'Donnell, M. E. Grein, J. Klamkin, S. M. Duff, et P. W. Juodawlkis, « Low-noise RF-amplifier-free slab-coupled optical waveguide coupled optoelectronic oscillators: physics and operation », *Opt. Express*, vol. 20, n° 17, p. 19420-19430, 2012.
- [14] J. Maxin, G. Pillet, M. Faugeron, F. Van Dijk, L. Morvan, O. Llopis, et D. Dolfi, « Oscillateur optoélectronique couplé », 2013.