



**HAL**  
open science

## Oscillateur optoélectronique: Modélisation et Amélioration des Performances

Zeina Abdallah, Arnaud Fernandez, Olivier Llopis

► **To cite this version:**

Zeina Abdallah, Arnaud Fernandez, Olivier Llopis. Oscillateur optoélectronique: Modélisation et Amélioration des Performances. Journées Nationales Micro-ondes, Jun 2015, Bordeaux, France. hal-01165721

**HAL Id: hal-01165721**

**<https://hal.science/hal-01165721>**

Submitted on 19 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.

## Oscillateur optoélectronique: Modélisation et Amélioration des Performances

Zeina Abdallah<sup>1,3</sup>, Arnaud Fernandez<sup>1,2</sup>, Olivier Llopis<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CNRS, LAAS, Univ. de Toulouse, Toulouse, France

<sup>2</sup>Univ. de Toulouse, UPS, Toulouse, France

<sup>3</sup>CNES, Toulouse, France

zabdalla@laas.fr

### Résumé

La simulation du bruit de phase des oscillateurs optoélectroniques est décrite, et plus particulièrement près de la porteuse (bruit en  $1/f$ ) qui est une limitation pour les systèmes à haute performance. Le processus principalement analysé est celui de la conversion du bruit d'amplitude du laser en bruit de phase RF. L'approche proposée démontre l'existence d'une puissance optique optimale, pour laquelle cette conversion est quasiment nulle, et par la suite permet une amélioration du bruit de phase des oscillateurs optoélectroniques basés sur des résonateurs optiques fibrés.

### 1. Introduction

Les technologies photonique micro-ondes, alliant les qualités intrinsèques de l'optique (faible masse, haut débit, faibles pertes, etc..) aux systèmes hyperfréquences, ont fait leur apparition dans les systèmes civils et militaires. Une application importante de ces liaisons est la génération de signaux RF stables et à haute pureté spectrale. Le composant essentiel de cette approche est l'oscillateur optoélectronique (OEO) [1], qui consiste à verrouiller une oscillation micro-onde sur une ligne à retard ou un résonateur optique. Cependant, la performance de ce système est affectée par les bruits générés par la partie optique de la boucle d'oscillation. Le plancher de bruit et le rapport signal sur bruit (CNR) peuvent être calculés en utilisant des formules qui tiennent compte des paramètres classiques, comme le bruit d'intensité relatif du laser (RIN), le bruit Schottky de la photodiode (PD) et le bruit thermique. Pourtant, si cette approche peut décrire le plancher de bruit de phase loin de la porteuse d'une liaison optique, elle restera incapable de décrire son bruit de phase près de la porteuse (bruit en  $1/f$ ).

Le bruit des lasers, comparé aux sources RF, est relativement élevé (qu'il s'agisse de bruit de fréquence (FM) ou d'amplitude (AM)). Il est donc important de minimiser la conversion de ce bruit vers la fréquence de l'application RF ou micro-onde. Le bruit AM du laser peut être converti en bruit de phase RF par des composants dont le temps de transit dépend de la

puissance optique ; c'est le cas de la photodiode [2]. Autrement dit, pour de faibles niveaux de puissance optiques, inférieurs à la puissance de saturation de la photodiode, le nombre des électrons et des trous augmente avec l'augmentation de la puissance lumineuse et, par la suite, la puissance RF en sortie de la photodiode augmente. Puisque la vitesse de propagation des porteurs dans la photodiode dépend du nombre de porteurs dans le semi-conducteur, la phase RF va également changer avec la puissance optique. Pour de faibles fluctuations d'intensité du laser, la conversion du RIN en bruit de phase RF est donnée par l'expression suivante [2] :

$$S_{\phi}(f) = RIN(f) \cdot P_{opt}^2 \cdot \left( \frac{d\Phi}{dP_{opt}} \right)^2 \quad (1)$$

où  $S_{\phi}(f)$  est la densité spectrale du bruit de phase ( $\text{rad}^2/\text{Hz}$ ) et  $d\Phi/dP_{opt}$  est la sensibilité de la phase RF aux variations de la puissance optique (en  $\text{rad}/\text{mW}$ ) causée par le retard à la photo-génération. Ce dernier paramètre ( $d\Phi/dP_{opt}$ ) est très important puisqu'il permet la détermination de la puissance optique optimale.

Cette conversion est prise en compte dans la modélisation de la liaison optique-RF pour l'optimisation du bruit de phase de l'OEO.

Un nouveau modèle non-linéaire (NL) de la PD décrivant la conversion du RIN du laser en bruit de phase RF, a été développé sous un logiciel commercial : Agilent ADS (la description de ce modèle est détaillée dans [3]). Ce modèle comprenant une cellule à retard RC non-linéaire, vient compléter un modèle des liaisons optiques sous ADS proposé il y a quelques années [4], mais qui était jusque-là incapable de décrire cette conversion près de la porteuse (bruit en  $1/f$ ). En ajoutant le modèle non-linéaire de la PD, une composante de bruit de phase en  $1/f$  peut maintenant être observée en sortie de la liaison et, par conséquent, le bruit de phase de l'oscillateur optoélectronique en boucle fermé issu de cette composante peut être calculé.

Le travail présenté est focalisé sur le calcul de ce bruit d'une part et, d'autre part, sur l'optimisation et l'amélioration des OEO basés sur des résonateurs optiques à fort facteur de qualité (Q).

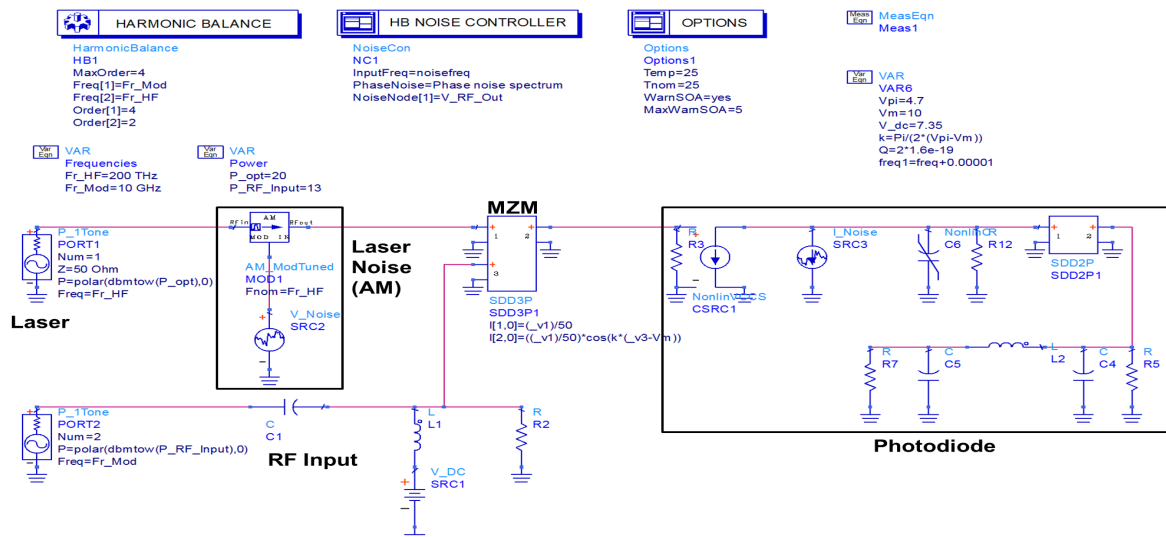


Figure 1 : Modèle de la liaison optique-RF implémenté sous ADS, incluant le laser avec son bruit AM, le modulateur de Mach-Zehnder (MZM) et le modèle non-linéaire de la photodiode.

## 2. Bruit de phase de l'OEO

### 2.a. Simulation du bruit de phase en boucle ouverte

La Figure 1 présente le modèle d'une liaison photonique en micro-onde déjà implémenté sous ADS, incluant le modèle non-linéaire de la PD.

Etant donné que la bibliothèque d'ADS ne contient pas de composants optoélectroniques, ces composants ont été décrits avec des équivalents électriques ou mathématiques. Le type de simulation utilisé est la balance harmonique. C'est une technique qui permet une analyse de systèmes mettant en œuvre des fréquences très différentes (dans notre cas : l'optique, les micro-ondes et les basses fréquences). En ce qui concerne la simulation de bruit, cette technique de simulation est capable de calculer l'effet d'une petite perturbation à une fréquence donnée sur les autres fréquences de simulation, en amplitude et en phase. C'est donc l'outil idéal pour simuler la conversion d'un bruit à une fréquence donnée vers une autre fréquence d'analyse (dans ce cas, la fréquence RF).

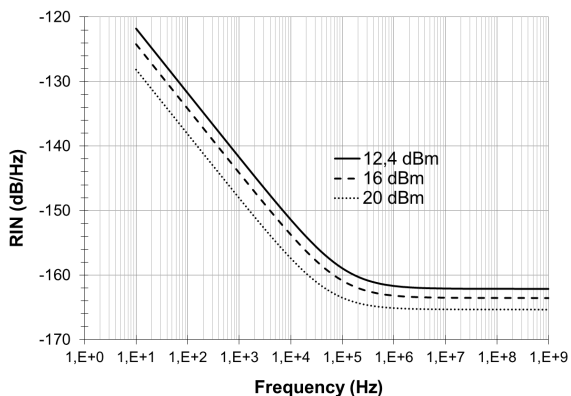


Figure 2: Bruit d'intensité relative du laser pour trois puissances optiques.

Dans ce modèle (Figure 1), le seul composant bruyant est le laser. Il est décrit par une source RF

suivie par un modulateur de bruit AM. Le bruit d'intensité relatif du laser a été mesuré sur un banc de mesure incluant deux configurations différentes, une pour mesurer le bruit en  $1/f$  et une autre pour mesurer le RIN aux fréquences micro-ondes [5]. Le bruit d'amplitude simulé est ajusté à ces mesures et est décrit à l'aide d'un modèle qui inclut une composante en  $1/f$  et un plancher de bruit blanc. La Figure 2 représente le RIN simulé du laser pour trois puissances optiques. Outre le bruit du laser, une composante de bruit Schottky est également ajoutée au modèle au niveau de la photodiode (courant de bruit de densité spectrale  $2qI_0$ , où  $q$  est la charge d'électron et  $I_0$  le photo-courant moyen).

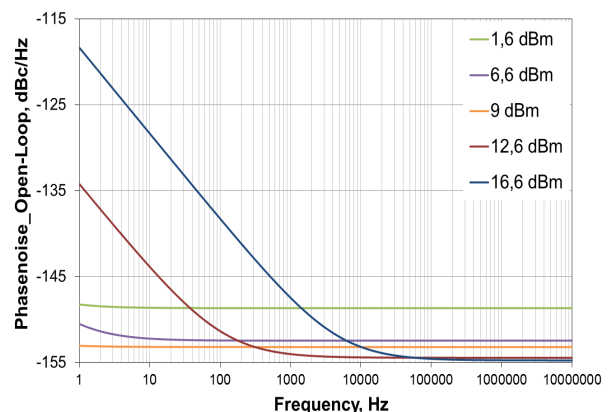
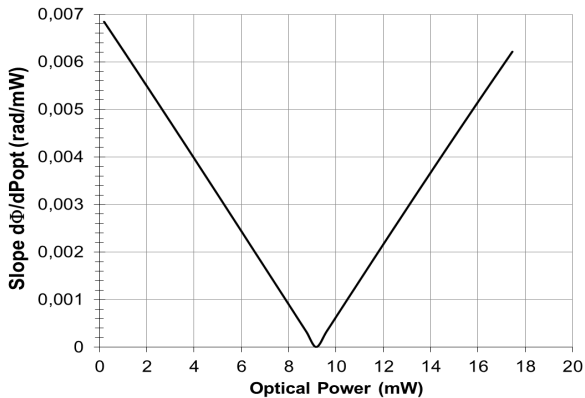


Figure 3: Bruit de phase en boucle ouverte simulé, pour différents niveaux de puissance optique.

Le bruit de phase à 10 GHz est simulé en utilisant une variable dédiée pour la simulation de bruit en régime non-linéaire (pnmx). En considérant que le laser est parfaitement verrouillé sur une résonance de 100 m de longueur, le bruit de phase RF simulé représente le bruit de phase RF de l'OEO en boucle ouverte. Comme le montrent les résultats présentés sur la Figure 3, le bruit en  $1/f$  est clairement visible pour des puissances optiques élevées et il diminue

considérablement pour une puissance optique pour laquelle le coefficient de conversion entre le bruit AM optique et le bruit de phase RF est nul (Figure 4).



**Figure 4: Coefficient de conversion de bruit AM en bruit de phase RF.**

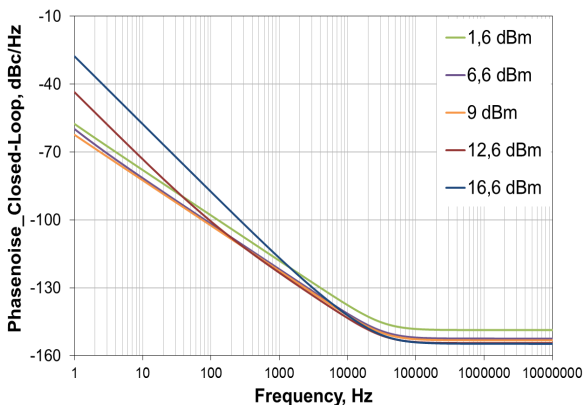
### 2.b. Bruit de phase en boucle fermée

Une fois le bruit de phase RF en boucle ouverte obtenu, le bruit de phase en boucle fermée peut être estimé en utilisant le modèle de Leeson [6]:

$$L_{OEO}(f_m) = 10 \log \left[ \left( \frac{f_{Opt}^2}{8 Q_{Opt}^2 f_m^2} + 1 \right) S_{OEO}^2 \right] \quad (2)$$

où  $f_{Opt}$  est la fréquence du laser (200 THz),  $f_m$  est la fréquence de modulation,  $Q_{Opt}$  est le facteur de qualité optique ( $2 \cdot 10^9$ ) et  $S_{OEO}^2$  est le bruit de phase en boucle ouverte simulé en  $\text{rad}^2/\text{Hz}$ .

Les résultats sont présentés sur la Figure 5.



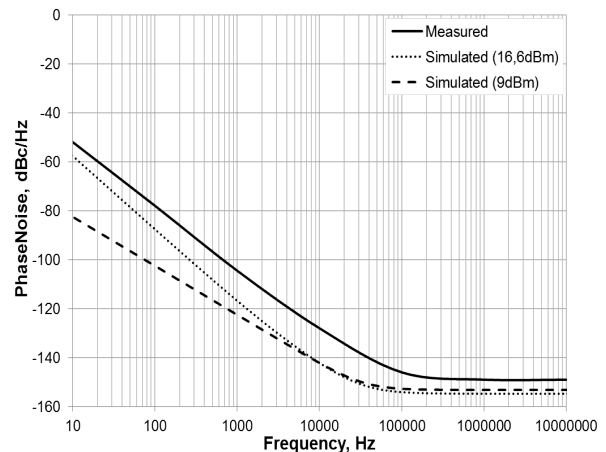
**Figure 5: Bruit de phase en boucle fermée calculé, pour différents niveaux de puissance optique.**

En comparant les résultats simulés et les mesures effectués (Figure 6) durant la thèse de K. Saleh [7] du bruit de phase en boucle fermée de l'oscillateur opto-électronique basés sur un résonateur optique fibré (fibre PM de 100 m de longueur), ces simulations prédisent un excellent niveau de bruit de phase pour cet oscillateur. Toutefois, deux sources de bruit n'ont pas été prises en compte dans cette simulation : le bruit de l'amplificateur RF et le bruit optique généré par les effets non-linéaires dans le résonateur fibré [8][9]. Donc, pour des puissances optiques fortes, des effets non-linéaires, dans le résonateur fibré viennent

dégrader fortement le bruit de phase, surtout près de la porteuse (bruit 1/f).

Pour des puissances optiques faibles, au-dessous de la puissance optique optimale, le bruit sera généré par les amplificateurs RF ou la conversion de RIN au niveau de la photodiode

Ce modèle est donc incomplet, et il faudra à terme y introduire les effets non-linéaires et le bruit optique dans le résonateur, ce qui est néanmoins difficile au niveau d'un simulateur RF.



**Figure 6: Bruit de phase en boucle fermée simulé et mesuré.**

## 3. Optimisation et amélioration de l'OEO

En parallèle à la modélisation, une approche expérimentale est menée sur un dispositif proposé lors de la thèse de K. Saleh [7]. La première approche a consisté à remplacer l'électronique du PID commercial de la boucle de Pound Drever Hall (PDH) par un circuit plus simple (intégrateur + additionneur) et faible bruit. Ce circuit a conduit à une très bonne stabilité de verrouillage du laser sur le résonateur à fort facteur de qualité. D'autres études portent sur une optimisation des dimensions de ce système, grâce à un verrouillage sur un laser à semi-conducteur.

Enfin, un OEO utilisant un nouveau type de résonateur est en cours de test mais, à ce stade, les résultats ne sont pas meilleurs que ceux écrits dans [7] ou représenté sur la Figure 6.

## 4. Conclusion

Une méthode de modélisation du bruit de phase de l'OEO est présentée. Cette technique permet de mieux comprendre et estimer une composante importante de bruit dans ces systèmes : le bruit issu du laser. Un optimum peut même être trouvé en fonction de la puissance optique sur la photodiode vis-à-vis de ce paramètre. Toutefois, d'autres composantes de bruit, de nature purement optiques, viennent se superposer à cette contribution et augmenter le bruit de phase de l'oscillateur par rapport au niveau théorique simulé. D'autres travaux de modélisation doivent donc être menés pour réduire ces contributions de bruit.

## 5. Remerciements

Ces travaux sont soutenus par le CNES, la DGA (contrat EDA «HIPPOMOS») et la région Midi-Pyrénées (contrat OPTOMILLIREF).

## 6. Bibliographie

- [1] X.S. Yao and L. Maleki, « *Optoelectronic microwave oscillator* », J. Opt. Soc. Am. B, vol.13, no.8, Aug. 1996, pp.1725-1735.
- [2] D. Eliyahu, D. Seidel, and L. Maleki, « *RF Amplitude and Phase-Noise Reduction of an Optical Link and an Opto-Electronic Oscillator* », IEEE Trans. On MTT, vol.56, no.2, pp.449-456, Feb. 2008.
- [3] Z. Abdallah, A. Rumeau, A. Fernandez, G. Cibiel, and O. Llopis, « *Nonlinear Equivalent-Circuit Modeling of a Fast Photodiode* », IEEE PTL, vol.26, no.18, pp.1840-1842, Sep. 2014.
- [4] H. Brahim, H.L. Martinez-Reyes, P.H. Merrer, a. Bouchier, and O. Llopis, « *A CAD approach of Microwave Optical Systems including Noise performance* », Proc. of the EuM Conf., Rome, pp.1642-1645, Italy, 2009.
- [5] H. Brahim, P. Lacroix, and O. Llopis, « *Optimisation of a microwave frequency discriminator based on an optical delay line* », IEEE Int. Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP), Valencia, Oct. 2009,
- [6] D.B. Leeson, « *A simple model of feedback oscillator noise spectrum* », Proc. of the IEEE, vol.54, no.2, pp.329-330 Feb. 1966.
- [7] K. Saleh, « *High spectral purity microwaves sources based on optical resonators* », Thèse à l'UPS, Toulouse, 2012.
- [8] G.P. Agrawal, « *Nonlinear Fiber Optics* », 4<sup>th</sup> edition, Academic Press, 2007.
- [9] O. Okusage, J. Cahill, W. Zhou, A. Socherty, G.M. Carter, and C.R. Menyuk, « *Optical scattering induced noise in RF-photonics systems* », Frequency control and the European Frequency and Time Forum (FCS), 2011 Joint conference of the IEEE International, pp.1-6, May 2011.