



**Journée du Club  
OCA  
Nice  
10 Juin 2016**



## **Peignes de fréquences optiques pour génération micro- onde à très bas bruit de phase**

Romain Bouchand<sup>1</sup>, Xiaopeng Xie<sup>1</sup>, Daniele Nicolodi<sup>1,\*</sup>, Michel Lours<sup>1</sup>, Michele Giunta<sup>2</sup>, Wolfgang Hänsel<sup>2</sup>, Matthias Lezius<sup>2</sup>, Ronald Holzwarth<sup>2</sup>, Abhay Joshi<sup>3</sup>, Shubhashish Datta<sup>3</sup>, Christophe Alexandre<sup>4</sup>, Pierre-Alain Tremblin<sup>5</sup>, Giorgio Santarelli<sup>3</sup> et Yann Le Coq<sup>1</sup>

*1 LNE-SYRTE, Observatoire de Paris, PSL Research University, CNRS, Sorbonne Université, UPMC Univ. Paris 06, 61 avenue de l'Observatoire, 75014 Paris*

*2 MenloSystems GmbH, Am Klopferspitz 19a, D-82152 Martinsried, Germany*

*3 Discovery Semiconductors Inc., 119 Silvia street, Ewing, New Jersey 08628, USA*

*4 Laboratoire Cedric, CNAM, 1 rue Gaston Boissier, 75015 Paris, France*

*5 LP2N, IOGS, CNRS, Université Bordeaux 1, rue Francois Mitterand, 33400 Talence, France*

*\* present address: National Institute of Standards and Technology, Boulder, Colorado 80305, USA  
email : yann.lecoq@obspm.fr*

Les peignes de fréquences optiques basés sur des lasers femtosecondes à mode-bloqués auto-référencés constituent le système de choix pour relier les fréquences optiques (quelques centaines de THz) et les fréquences RF, micro-onde, ou THz. Depuis quelques années, plusieurs groupes dans le monde effectuent de recherches ayant pour but de générer des signaux de références micro-ondes à très bas bruit de phase en asservissant un peigne de fréquence optique sur un laser ultra-stable de référence à l'état de l'art et en détectant le train de pulse optiques à l'aide d'une photodiode rapide permettant la génération micro-onde proprement dite. Le facteur de division gigantesques entre les fréquences optiques et les fréquences micro-ondes (20000 pour une génération à 10GHz à partir d'un laser continu de référence à 200THz – soit une longue d'onde de 1,5 $\mu$ m) permet une division d'un facteur identique du bruit de phase de la référence optique. Cet effet, combiné aux performances exceptionnelles couramment réalisés dans l'optique avec des laser asservis sur cavité Fabry-Perot de très hautes finesse ultra-stables, permet - en principe - la génération de signaux micro-ondes présentant un bruit de phase plus faible que toute autre technologie existante pour une large gamme de fréquences de Fourier (typiquement de 1Hz à plusieurs centaines de kHz).

De nombreux effets parasites peuvent néanmoins entachés le processus de division de fréquence de l'optique vers la micro-onde. Nous exposerons les différentes causes de bruit et les méthodes que nous avons développé pour les réduire au minimum, en particulier les bruits Johnson-Nyquist, bruit de grenaille et conversion amplitude phase dans le processus de photodétection des trains de pulses. Nous présenterons également la méthode d'asservissement du peigne de fréquence sur la référence optique continue que nous avons développé. En appliquant l'ensemble des méthodes exposées, nous parvenons aujourd'hui à générer des signaux à 12GHz présentant un bruit de phase absolu inférieur à -10dBc/Hz à 1 Hz de la porteuse, et inférieur à -170dBc/Hz à 3kHz de la porteuse et au-delà (limité par le bruit de grenaille lié au nombre fini de photo-électrons produits dans le processus de photo-détection du train d'impulsions optiques femto-secondes). Ce niveau de performance constitue l'état de l'art de toute technologies existante actuellement.

La caractérisation et la mesure du bruit de phase micro-onde ainsi produit est, au niveau de performance obtenu, en soit un véritable challenge, les appareils commerciaux existant ne permettant pas d'atteindre une telle résolution pour des bruits de phases absolus, qui plus est pour des signaux présentant un bruit d'amplitude associé nettement plus élevé que le bruit de phase à caractériser. Nous avons, dans cet objectif, développés notre propre système de mesure basé sur un cross-corrélateur hétérodyne réalisé par un FPGA couplé à des convertisseurs analogiques numériques rapides et un micro-ordinateur pour les dernières étapes du traitement de données. Le système global de caractérisation fait intervenir 3 cavité de références ultra-stables, 3 peignes de fréquences optique complets indépendants et leurs systèmes de génération de micro-ondes bas bruit et notre cross-corrélateur hétérodyne. Nous présenterons les principales caractéristiques de ce banc de mesure, seul à même de démontrer le niveau de performance finalement obtenu.

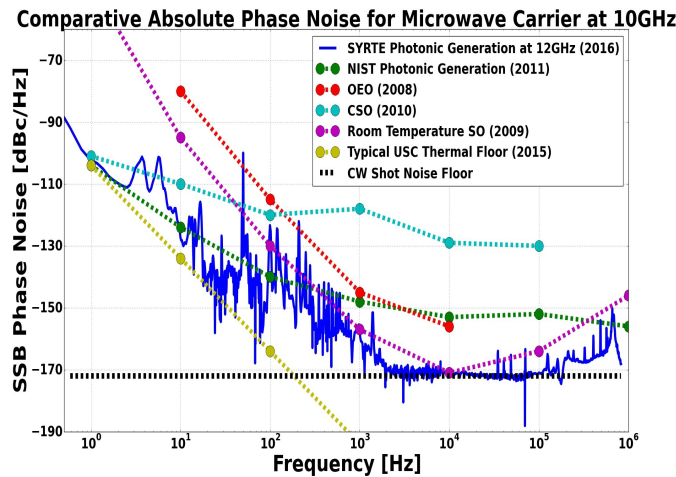


Figure 1. Bruit de phase absolu obtenu par le système du LNE-SYRTE à base de peigne de fréquences optiques (bleu foncé), comparé aux performances typiques obtenues par divers systèmes à l'état de l'art actuel (bleu clair, rouge, violet et vert). La courbe en vert pale correspond à la projection à 10GHz du bruit typique d'un oscillateur optique à l'état de l'art à 200THz (soit 1,5 $\mu$ m de longueur d'onde). Les pointillés noirs correspondent à une évaluation, pour notre système, de la limite due au bruit de grenaille.

#### Références :

- [1] J. Millo, R. Boudot, M. Lours, P.Y. Bourgeois, A.N. Luiten, Y. Le Coq, Y. Kersalé, G. Santarelli, "Ultra-low noise microwave extraction from fiber-based optical frequency comb", *Optics Letters* 34, 3707 (2009)
- [2] W. Zhang, Z. Xu, M. Lours, R. Boudot, Y. Kersalé, G. Santarelli, Y. Le Coq, "Sub-100 attoseconds stability optics-to-microwave synchronization", *Applied Physics Letters* 96, 211105 (2010)
- [3] W. Zhang, Z. Xu, M. Lours, R. Boudot, Y. Kersalé, A.N. Luiten, Y. Le Coq and G. Santarelli, "advanced noise reduction technique for ultra-low phase noise optical-to-microwave division with femtoseconds fiber combs", *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control* 58, 900 (2011).
- [4] D. Nicolodi, B. Argence, W. Zhang, R. Le Targat, G. Santarelli and Y. Le Coq "Spectral purity transfer between optical wavelengths at the 10<sup>-18</sup> level", *Nature Photonics* 8, 219 (2014).
- [5] B. Argence, B. Chanteau, O. Lopez, D. Nicolodi, M. Abgrall, C. Chardonnet, C. Daussy, B. Darquie, Y. Le Coq, A. Amy-Klein, "Quantum cascade laser stabilization at sub-Hz-level by use of a frequency comb and optical link", *Nature Photonics* 9, 456 (2015)
- [6] J. Millo, D. V. Magalhaes, C. Mandache, Y. Le Coq, E. M. L. English, P. G. Westergaard, J. Lodewyck, S. Bize, P. Lemonde, G. Santarelli, "Ultrastable lasers based on vibration insensitive cavities", *Phys. Rev. A* 79, 053829 (2009).
- [7] J. Millo, M. Abgrall, M. Lours, E.M.L. English, H. Jiang, J. Guena, M.E. Tobar, A. Clairon, S. Bize, Y. Le Coq, G. Santarelli, "Ultra-low noise microwave generation with fiber-based optical frequency comb and application to atomic fountain clock", *App. Phys. Lett.*, 94, 141105 (2009).
- [8] A. Haboucha, W. Zhang, T. Li, M Lours, A. N. Luiten, Y. Le Coq and G. Santarelli, "An Optical Fibre Pulse Rate Multiplier for Ultra-low Phase-noise Signal Generation", *Optics Letters* 36, 3654 (2011).
- [9] W. Zhang, T. Li, M. Lours, S. Seidelin, G. Santarelli and Y. Le Coq, "Amplitude to phase conversion of InGaAs pin photo-diodes for femtosecond lasers microwave signal generation", *Applied Physics B* 106, 301 (2012).
- [10] W. Zhang, S. Seidelin, A. Joshi, S. Datta, G. Santarelli and Y. Le Coq, "Dual photo-detector system for low phase noise microwave generation with femtosecond lasers", *Optics Letters* 39, 1204 (2014)