HAL
open science

OSCILLATEUR OPTO-RF CHAOTIQUE VERROUILLÉ EN FRÉQUENCE

Aurélien Thorette, Marco Romanelli, Marc Brunel, Marc Vallet

To cite this version:

Aurélien Thorette, Marco Romanelli, Marc Brunel, Marc Vallet. OSCILLATEUR OPTO-RF CHAOTIQUE VERROUILLÉ EN FRÉQUENCE. Optique Bordeaux 2016, Jul 2016, Bordeaux, France. hal-02504229

HAL Id: hal-02504229

https://hal.science/hal-02504229

Submitted on 10 Mar 2020

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 OPTO-RF CHAOTIQUE VERROUILLÉ EN FRÉQUENCE

Aurélien Thorette, Marco Romanelli, Marc Brunel, Marc Vallet

Institut de Physique de Rennes, UMR Université Rennes I - CNRS 6251, Campus de Beaulieu, 35042 Rennes Cedex, France

aurelien.thorette@univ-rennes1.fr

RÉSUMÉ

Un oscillateur opto-RF synchronisé en fréquence sur une référence externe est étudié dans un régime chaotique. Pour certains paramètres du couplage, il apparaît un régime particulier de *phase bornée chaotique*, dans lequel le verrouillage de la fréquence moyenne est conservé en dépit d'oscillations chaotiques de l'amplitude et de la phase. Ce régime, prévu numériquement, est observé expérimentalement sur un laser bi-fréquence Nd:YAG. De plus, nous vérifions à partir du bruit de phase que la stabilité à long terme de l'oscillateur de référence reste transférée à l'oscillateur chaotique.

MOTS-CLEFS : *laser, injection, optique micro-onde, chaos*

L'oscillateur opto-RF consiste en un laser solide bi-fréquence Nd :YAG, produisant deux modes de polarisation orthogonaux dont le battement est synchronisé sur un synthétiseur RF via une réinjection optique (Fig. 1, réf. [1]). La dynamique du système réinjecté est modélisé par des *rate equations* de type Lang-Kobayashi décrivant l'évolution du champ électrique pour les deux polarisations et des populations. Celles-ci rendent compte du couplage entre les deux modes dans le milieu actif, et du couplage externe lié à la réinjection décalée en fréquence. Celui-ci est caractérisé par son intensité Γ et par le désaccord en fréquence Δ. Ce modèle est décrit précisément dans l'article [2].

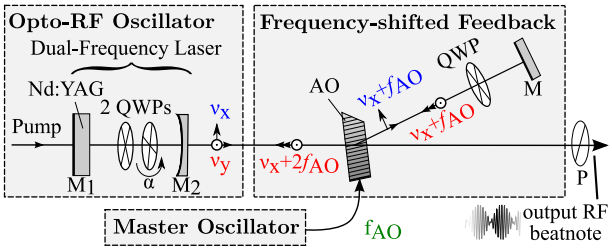

FIGURE 1 : Dispositif expérimental. Les deux polarisations du laser bi-fréquence produisent un battement RF sur porteuse optique, qui est ensuite synchronisé sur un oscillateur de référence par réinjection décalée en fréquence.

L'intégration de ces équations permet d'identifier différents régimes de fonctionnement en accord avec les observations. À faible désaccord ou fort couplage ($\Delta < \Gamma$), la phase de l'oscillateur se verrouille sur celle de la référence : la phase relative est constante au cours du temps. Lorsque le désaccord augmente ou que le couplage diminue, si le système présente une bifurcation de Hopf supercritique, on peut observer un régime de *phase bornée* dans lequel il y a verrouillage de la fréquence moyenne de l'oscillateur sur celle de la référence externe, bien que leur phase relative oscille [1].

Nous montrons ici, et observons expérimentalement que dans le cas d'une bifurcation de Hopf sous-critique, il peut exister un régime de *phase bornée chaotique* [3], dans lequel la fréquence moyenne est verrouillée, la phase relative restant inférieure à 2π. Mais celle-ci, ainsi que l'enveloppe du signal en sortie de l'oscillateur, présente des variations chaotiques (Fig. 2).

Afin de caractériser la qualité spectrale de notre oscillateur dans ce nouveau régime chaotique, nous avons calculé la densité spectrale de la phase relative, aussi appelée *bruit de phase*. Nous montrons que bien que le comportement soit chaotique, ce régime permet tout de même de transférer la pureté

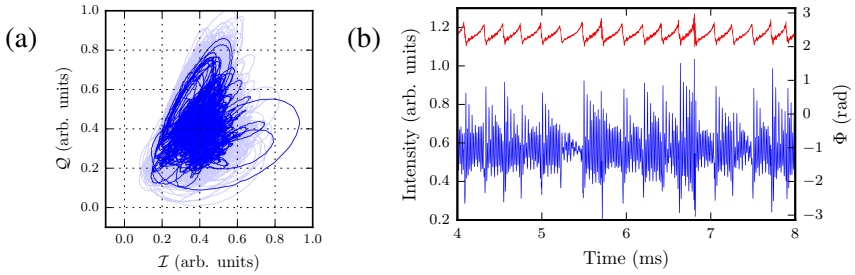

FIGURE 2 : (a) Observation expérimentale dans le plan de Fresnel (IQ) du régime chaotique à phase bornée (bleu clair : 100ms, foncé : 10ms). (b) Série temporelle correspondante de l'intensité ($\sqrt{I^2+Q^2}$, bleu) et de la phase (rouge). I et Q sont les deux quadratures du signal $|E_x+E_y|^2$, démodulé à la fréquence de référence $f_{\text{ref}} = 2f_{AO}$.

spectrale de la référence sur l'oscillateur (Fig. 3). En effet, de façon surprenante, le bruit de phase autour de la fréquence de référence reste bien plus faible que dans le cas d'une dérive de la phase. Comme le montre la figure 3a, le bruit de phase à 100 Hz de la porteuse est au même niveau (le seuil de détection) dans le cas chaotique et dans le cas du verrouillage de phase. Ce niveau est au moins 30 dB en dessous du bruit de l'oscillateur libre. La stabilité à long terme d'une référence peut ainsi être transférée sur la fréquence moyenne d'un oscillateur qui présente des variations chaotiques d'intensité et de phase relative.

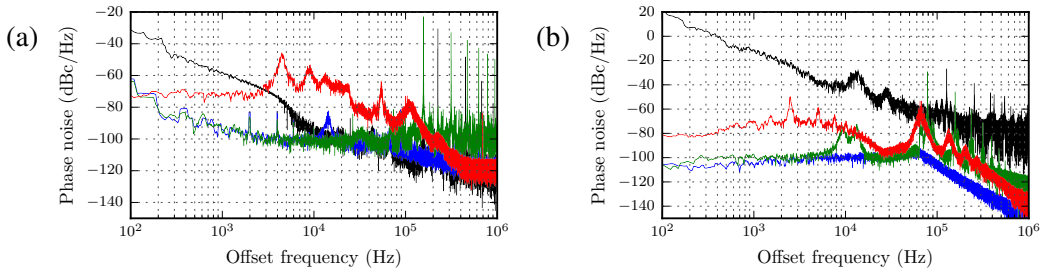

FIGURE 3 : (a) Bruit de phase expérimental pour différents régimes pour $\Gamma \approx 0,9$ (noir : dérive ; bleu : verrouillé ; vert : phase bornée ; rouge : chaos borné). (b) Bruit de phase calculés numériquement à $\Gamma = 0,9$ (noir : $\Delta = 1,8$; bleu : $\Delta = 0,8$; vert : $\Delta = 1,1$; rouge : $\Delta = 0,91$).

Comme c'est le cas pour le régime de phase bornée non-chaotique [1], nous nous attendons à ce que ce comportement soit générique et présent sur d'autre types de systèmes. L'étude peut être poursuivie avec l'effet du facteur de Henry et du retard induit par la réinjection, que ce soit dans les lasers solides ou à semi-conducteurs [4]. Ce régime pourrait également trouver des applications en télémétrie, avec par exemple le lidar chaotique [5].

RÉFÉRENCES

[1] M. Romanelli, L. Wang, M. Brunel et M. Vallet, "Measuring the universal synchronization properties of driven oscillators across a hopf instability," *Optics Express*, **22**, 7364 (2014).

[2] J. Thévenin, M. Romanelli, M. Vallet, M. Brunel et T. Erneux, "Phase and intensity dynamics of a two-frequency laser submitted to resonant frequency-shifted feedback," *Physical Review A*, **86**, 033815 (2012).

[3] A. Thorette, M. Romanelli, M. Brunel et M. Vallet, "Frequency-locked chaotic opto-rf oscillator," *Optics Letters*, submitted (2016).

[4] L. Wang, M. Romanelli, M. Vallet, M. Brunel et T. Erneux, "Photonic microwave oscillator based on monolithic dfb lasers with frequency-shifted feedback," *Electronics Letters*, **50**, 451 (2014).

[5] F.-Y. Lin et J.-M. Liu, "Chaotic radar using nonlinear laser dynamics," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **40**, 815 (2004)