



HAL
open science

Verrouillage de soliton par auto-injection sur Fabry-Pérot fibré pour la synthèse microonde faible bruit de phase

Germain Bourcier, Arnaud Fernandez, Olivier Llopis

► To cite this version:

Germain Bourcier, Arnaud Fernandez, Olivier Llopis. Verrouillage de soliton par auto-injection sur Fabry-Pérot fibré pour la synthèse microonde faible bruit de phase. Journée du Club Optique Micro-onde (JCOM) 2025, Jun 2025, Toulouse, France. <hal-05175704>

HAL Id: hal-05175704

<https://laas.hal.science/hal-05175704v1>

Submitted on 22 Jul 2025

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.



HAL Authorization



JCOM 2025
12 juin 2025
LAAS Toulouse



Verrouillage de soliton par auto-injection sur Fabry-Pérot fibré pour la synthèse microonde faible bruit de phase

Germain Bourcier, Arnaud Fernandez, Olivier Llopis
LAAS-CNRS, Université de Toulouse, CNRS, UPS, Toulouse, France

Le résonateur Fabry-Perot fibré (FFP) constitue une plateforme innovante, comme en témoigne l'intérêt croissant pour son utilisation, notamment dans la génération de peignes de fréquence [1] et la stabilisation par auto-injection [2]. Il offre une alternative compacte et robuste aux microrésonateurs et aux anneaux fibrés, comblant l'écart entre ces deux technologies en termes de taux de répétition, avec des fréquences de l'ordre du GHz. Grâce aux faibles pertes intrinsèques des fibres, le FFP atteint de très hauts facteurs de qualité (jusqu'à $5 \cdot 10^9$) [3], et permet la génération de peignes très étalés (jusqu'à 28 THz [1]). Le FFP est constitué d'un segment de fibre optique équipé de connecteurs FC-PC, à la surface desquels des miroirs à haute réflectivité sont déposés, présentant une bande passante de 80 nm centrés à $1.55 \mu\text{m}$. Alors que la génération de solitons de cavité dans la littérature repose généralement sur des pompes à des niveaux de puissance proches du watt, accompagnés de balayages en fréquence jusqu'à l'atteinte du « *step* » soliton, le tout au prix de systèmes de stabilisation électronique complexes [1], nous rapportons ici l'observation de solitons obtenus par verrouillage par auto-injection (*self-injection locking*, SIL) dans un FFP hautement non-linéaire, avec seulement 100 mW de puissance en pompage continu et un bruit de phase ultra-faible.

Dans notre expérience, le laser utilisé est une source DFB sans isolateur (Gooch & Housego). Le processus de self-injection locking consiste à réinjecter dans le laser une portion de son propre signal, filtrée par le résonateur FFP au moyen d'un circulateur, comme illustré en figure 1(a). Ce mécanisme permet une réduction significative du bruit du laser, avec un abaissement du bruit de fréquence d'un facteur 10^4 , ainsi qu'un rétrécissement de la largeur de raie, grâce au très haut facteur de qualité du résonateur, comme nous l'avons démontré dans une étude précédente [2].

Le système complet a été modélisé à l'aide notamment des équations de Lang et Kobayashi [4] afin de décrire la dynamique de verrouillage. Une parfaite correspondance entre le modèle et les résultats expérimentaux est obtenue en régime linéaire (faible puissance de pompe), conformément aux observations déjà largement rapportées dans des travaux antérieurs [5,6]. Cette étude a ensuite été étendue pour intégrer l'effet Kerr optique à travers l'auto-modulation de phase qui a pour effet d'incliner la résonance [7]. La courbe de verrouillage pour le SIL en présence de non-linéarités est présentée en figure 1(b) par le tracé orange, tandis que les résultats obtenus en régime linéaire sont ajoutés en gris pour comparaison. Le paramètre ζ est proportionnel à la fréquence émise par le laser, tandis que ξ est proportionnel au courant d'alimentation du laser. Les résonances associées sont également tracées sur un second système d'axes. Sous l'effet de l'automodulation de phase, une distorsion notable de la courbe de verrouillage est observée. Lors du balayage de la fréquence laser du « detuning » négatif à positif, une région spécifique de l'intervalle de verrouillage, désignée comme « *locked state region* », apparaît, comme indiqué par les lignes pointillées rouges. Nous démontrons alors théoriquement que le laser peut se verrouiller directement dans la zone d'existence des solitons. Ce processus de balayage du « detuning » a été reproduit expérimentalement avec une puissance comprise entre 80 mW et 100 mW. À notre connaissance, il s'agit de la première démonstration de génération de peignes de fréquences dans un FFP avec des puissances inférieures à 100 mW.

La figure 2(c) montre le signal RF issu du battement (beatnote) de l'ensemble des raies du peigne soliton et les inserts des figures 2(c) et 2(d) représentent les spectres de solitons de cavité mesurés à l'analyseur de spectre optique (OSA). Ces spectres correspondent à la présence de multiples solitons circulant dans le FFP. La figure 2(d) représente le bruit de phase associé au battement des deux peignes montrés en insert. La courbe orange correspond à un cristal de solitons, caractérisé par des motifs d'impulsions espacées de $1/(N \cdot \text{ISL})$ (N entier positif). Le bruit de phase associé est inférieur à -70 dBc/Hz à 10 Hz de la fréquence porteuse, et descend à -120 dBc/Hz à 1 MHz. La courbe bleue,

correspondant à de multiples solitons, présente un bruit de phase inférieur à -80 dBc/Hz à 10 Hz, relativement plat jusqu'à plusieurs dizaines de kHz, puis chutant sous -100 dBc/Hz à 1 MHz.

Nous démontrons ainsi la génération de solitons de cavité dans un résonateur FFP par le biais du processus de self-injection locking (SIL), permettant la production d'un battement RF de très faible bruit de phase, centré autour de 500.49 MHz.

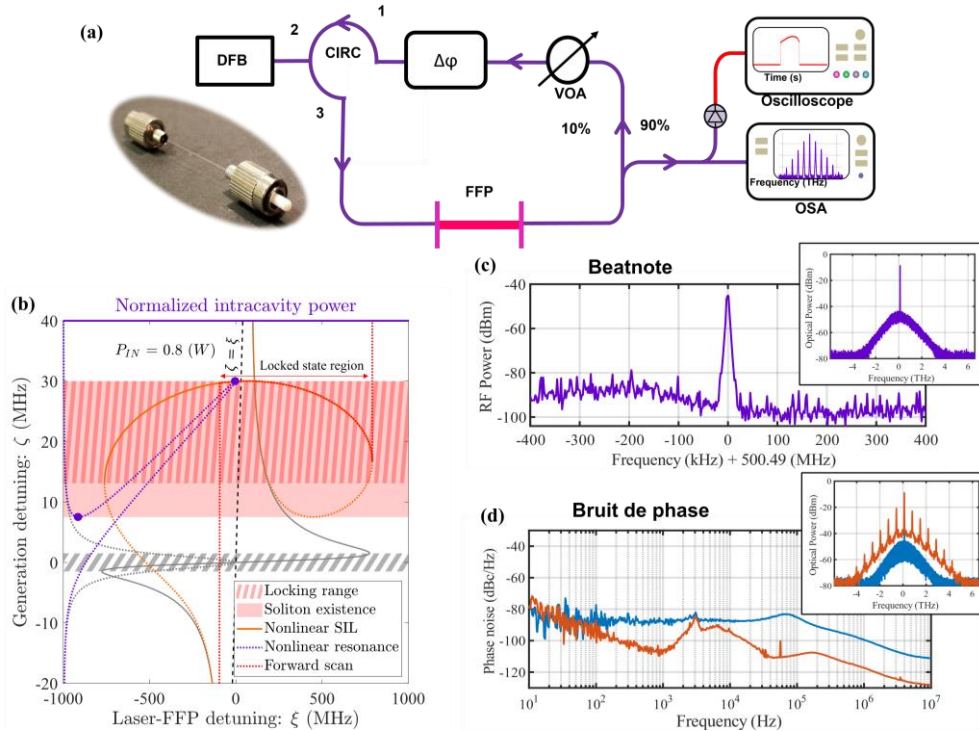


Figure 1. (a) Schéma du système SIL avec laser DFB, circulateur (CIRC), atténuateur variable (VOA), coupleur 90/10 et déphaseur ; Mesures réalisées à l'aide d'un oscilloscope, d'un analyseur de spectre optique (OSA) et d'un analyseur de spectre électrique pour la mesure du bruit de phase (non montré ici). (b) Courbes de verrouillage modélisées avec/sans auto-modulation de phase (orange/gris foncé) et résonances associées (violet/gris clair). (c) Beatnote et (d) bruit de phase de différents peignes de fréquences foncés correspondant à de multiples solitons (violet et bleu) et à un cristal de solitons (orange).

Remerciements : CNES et Agence Innovation Défense

Références :

- [1] T. Bunel *et al.*, « 28 THz soliton frequency comb in a continuous-wave pumped fiber Fabry-Pérot resonator », *APL Photonics*, vol. 9, n° 1, p. 010804, Jan. 2024, doi: [10.1063/5.0176533](https://doi.org/10.1063/5.0176533).
- [2] S. M. Ousaid *et al.*, « Low phase noise self-injection-locked diode laser with a high-Q fiber resonator: model and experiment », *Opt. Lett.*, vol. 49, n° 8, p. 1933, Apr. 2024, doi: [10.1364/OL.514778](https://doi.org/10.1364/OL.514778).
- [3] S. M. Ousaid *et al.*, « Mini résonateurs Fabry-Pérot fibrés à très haute finesse », *Optique Normandie 2024*, Jul 2024, Rouen, France. ([hal-04687201](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-04687201)).
- [4] R. Lang et K. Kobayashi, « External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties », *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 16, n° 3, p. 347-355, Mar 1980, doi: [10.1109/JQE.1980.1070479](https://doi.org/10.1109/JQE.1980.1070479).
- [5] J. Geng, *et al.*, « Stability in self-injection locking of the DFB laser through a fiber optic resonator », *Optics Commun*, vol. 505, p. 127531, Feb. 2022, doi: [10.1016/j.optcom.2021.127531](https://doi.org/10.1016/j.optcom.2021.127531).
- [6] N. M. Kondratiev *et al.*, « Self-injection locking of a laser diode to a high-Q WGM microresonator », *Opt. Express*, vol. 25, n° 23, p. 28167, Nov. 2017, doi: [10.1364/OE.25.028167](https://doi.org/10.1364/OE.25.028167).
- [7] A. S. Voloshin *et al.*, « Dynamics of soliton self-injection locking in optical microresonators », *Nat Com.*, vol. 12, n° 1, p. 235, Jan. 2021, doi: [10.1038/s41467-020-20196-y](https://doi.org/10.1038/s41467-020-20196-y).