



HAL
open science

Génération de soliton de cavité par self-injection locking sur un résonateur Fabry-Perot fibré avec puissance de pompe sub-100 mW

Germain Bourcier, Stéphane Balac, Julien Lumeau, Antonin Moreau, Thomas Bunel, Arnaud Mussot, Matteo Conforti, Arnaud Fernandez, Olivier Llopis

► To cite this version:

Germain Bourcier, Stéphane Balac, Julien Lumeau, Antonin Moreau, Thomas Bunel, et al.. Génération de soliton de cavité par self-injection locking sur un résonateur Fabry-Perot fibré avec puissance de pompe sub-100 mW. Journées Nationales d'Optique Guidée (JNOG) 2025, Jul 2025, Sète, France. <hal-05175717>

HAL Id: hal-05175717

<https://laas.hal.science/hal-05175717v1>

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

Génération de soliton de cavité par self-injection locking sur un résonateur Fabry-Perot fibré avec puissance de pompe sub-100 mW

Germain BOURCIER^{1,2}, Stéphane BALAC³, Julien LUMEAU⁴, Antonin MOREAU⁴,
Thomas BUNEL⁵, Arnaud MUSSOT⁵, Matteo CONFORTI⁵, Arnaud FERNANDEZ¹,
Olivier LLOPIS¹

¹ LAAS-CNRS, Université de Toulouse, CNRS, UPS, Toulouse, France

² CNES, 18 avenue Edouard Belin, F-31401 Toulouse, France

³ IRMAR, Université de Rennes, CNRS, Campus de Beaulieu, 35042 Rennes, France

⁴ Université Aix Marseille, CNRS, Centrale Med, Institut Fresnel, Marseille, France

⁵ Université de Lille, CNRS, UMR-8523-PhLAM Physique des Lasers Atomes et Molécules, F-59000, Lille, France

gbourcier@laas.fr

RESUME

Génération de solitons par self-injection locking d'un DFB sur un résonateur Fabry-Perot fibré. Le processus de verrouillage est étudié analytiquement, incluant l'auto-modulation de phase. La théorie comme l'expérience révèlent un large intervalle de verrouillage assurant un accès stable à divers peignes de fréquences et un faible bruit de phase.

MOTS-CLEFS : *résonateur Fabry-Perot fibré ; Self-injection locking ; soliton de cavité ; peigne de fréquence.*

1. INTRODUCTION

Le résonateur Fabry-Perot fibré (FFP) est une plateforme innovante comme le montre l'enthousiasme récent autour de son utilisation en particulier pour la génération de peignes de fréquence [1] ou la stabilisation par rétro-injection [2]. Il offre une alternative compacte et robuste aux micro-résonateurs et aux anneaux fibrés, et permet d'obtenir de hauts facteurs de qualité (jusqu'à 10^9) [3] et des taux de répétition de l'ordre du GHz avec des peignes s'étalant jusqu'à 28 THz [1]. Le FFP consiste en un segment de fibre optique équipé de connecteurs FC-PC à la surface desquels des miroirs de haute réflectivité sont déposés avec une largeur de bande de 80 nm centrés à 1.55 μm . Alors que la littérature montre la génération de solitons en pompant le FFP avec des niveaux de puissance proches du watt et des balayages en fréquence jusqu'au « step » soliton, le tout en utilisant des systèmes complexes de stabilisation électronique [1], nous rapportons ici l'observation de solitons de cavité obtenus par self-injection locking (SIL) dans un FFP hautement non-linéaire avec seulement 100 mW de puissance en pompage continu. Le laser utilisé est un DFB sans isolateur Gooch & Housego. Le processus de self-injection locking consiste à injecter dans le laser une portion de son propre signal filtré par le FFP à l'aide d'un circulateur comme le montre la Figure 1. Cela a pour effet d'abaisser fortement le bruit du laser, d'un facteur 10^4 sur le bruit de fréquence, et de réduire la largeur de raie grâce au très haut facteur de qualité du résonateur comme nous l'avons démontré dans une précédente étude [2].

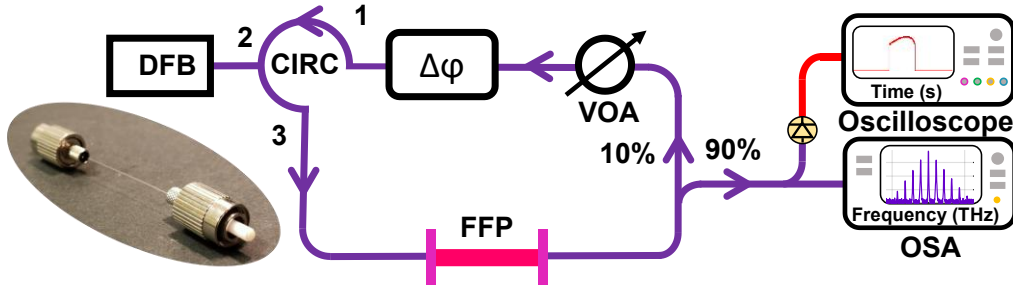


Figure 1 : Schéma du système SIL avec laser DFB, circulateur (CIRC), atténuateur variable (VOA), coupleur 90/10 et déphaseur. Mesures réalisées à l'aide d'un oscilloscope et d'un analyseur de spectre optique (OSA).

Le système complet a été modélisé à l'aide notamment des équations de Lang et Kobayashi [4] afin d'expliquer le processus de verrouillage. Nous obtenons une parfaite correspondance entre modèle et résultats expérimentaux en régime linéaire (faible puissance de pompe) ce qui a largement été décrit dans de précédents travaux [5,6]. Nous avons ensuite étendu cette étude pour tenir compte de l'effet Kerr optique à travers l'auto-modulation de phase qui a pour effet de « tilter » la résonance [7]. Les équations qui définissent le processus de Self-injection locking sous l'effet de l'auto-modulation de phase sont les suivantes :

$$\bar{\xi} = \xi - 6L\gamma P_{IC}/2\pi\tau \quad (1)$$

$$\bar{\zeta} = \zeta - 6L\gamma P_{IC}/2\pi\tau \quad (2)$$

$$\bar{\xi} = \bar{\zeta} + \bar{K}|T(\bar{\zeta})| \sin \psi(\bar{\zeta}) \quad (3)$$

Où ξ correspond au « detuning » en fréquence Laser-FFP, proportionnel au courant d'alimentation du laser, ζ est le « detuning » effectif correspondant à la fréquence d'émission, P_{IC} est la puissance intra-cavité, L est la longueur du FFP, γ est le coefficient non-linéaire, τ est le temps de trajet aller-retour dans le FFP, T représente la fonction de transfert du résonateur, ψ est le délai de phase total et \bar{K} est le facteur de couplage dépendant de l'atténuation du système, du facteur de qualité du FFP et du temps de trajet aller-retour dans le DFB.

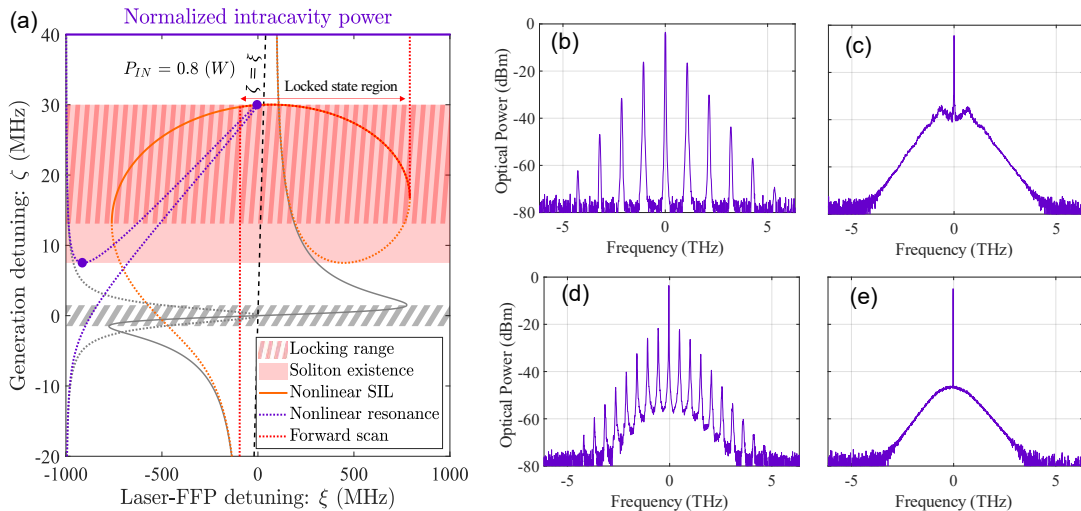


Figure 2 : (a) Courbes de verrouillage modélisées avec/sans auto-modulation de phase (orange/gris foncé) et résonances associées (violet/gris clair). Le balayage du « detuning » suit le tracé en pointillé rouge. (b-e) Spectres expérimentaux de peignes générés à 100 mW : (b) peigne primaire, (c) peigne chaotique, (d) cristal de soliton (avec défauts), (e) multiples solitons.

La relation (3) décrit la courbe de verrouillage pour le SIL non-linéaire qui est tracé en orange sur la Figure 2(a). Pour comparer avec les résultats en régime linéaire la courbe de verrouillage linéaire est ajoutée en gris. De plus, les résonances correspondantes sont tracées sur un autre système d'axes. Nous constatons alors la distorsion de la courbe de verrouillage avec l'auto-modulation de phase. Quand la fréquence du laser est scannée du « detuning » négatif à positif, une région spécifique désignée par « locked state region » dans l'intervalle de locking est mise en évidence 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 réalisé expérimentalement avec une puissance entre 80 mW et 100 mW. Nous avons pu mettre en évidence la génération de peignes de fréquences, une première à notre connaissance dans un FFP avec des puissances inférieures à 100 mW. La Figure 3 montre les spectres obtenus à l'OSA. Initialement, des peignes primaires associés au début des instabilités de modulation (pattern de Turing) ont été observés (Figure 2(b)). Une augmentation du courant (du « detuning ») conduit à remplir toutes les résonances, résultant en des peignes chaotiques (Figure 2(c)). Ensuite, au-delà du régime chaotique, nous observons l'émergence de solitons multiples (Figures 2 (d et e) dont des cristaux de solitons (d), puis le soliton unique. Leur bruit de phase a été mesuré à -80 dBc/Hz à 10 Hz de la porteuse sur la fréquence de battement à 500 MHz.

CONCLUSION

Grâce à la diminution de la largeur de raie du laser apportée par le self-injection locking, nous avons généré des peignes de fréquence à faible bruit de phase avec une puissance de pompe inférieure à 100 mW, ne nécessitant donc pas d'amplificateur de puissance ni de laser ultra-stable. Un réglage fin du courant du laser permet d'accéder au peigne primaire ainsi qu'au régime de solitons de cavité. Nous démontrons également dans cette étude qu'en dérivant des relations décrivant le comportement du laser lorsque la puissance de transmission du résonateur est renvoyée au laser, il est possible de stabiliser le laser dans la zone d'existence des solitons de cavité, ce qui est particulièrement intéressant du point de vue applicatif. En conclusion, cette étude fait non seulement progresser la compréhension de la dynamique non-linéaire dans un système couplé avec un laser et un résonateur, mais démontre aussi qu'il s'agit d'une plateforme robuste et polyvalente pour la génération de peignes de fréquence à base de solitons. Ces résultats ouvrent la voie à une exploration plus approfondie du SIL sur FFP à haut facteur de qualité, offrant des opportunités passionnantes pour la recherche fondamentale comme pour des applications technologiques.

REFERENCES

- 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 M. Nie, *et al.*, « Synthesized spatiotemporal mode-locking and photonic flywheel in multimode mesoresonators », *Nat Commun*, vol. 13, n° 1, p. 6395, Oct. 2022, doi: [10.1038/s41467-022-34103-0](https://doi.org/10.1038/s41467-022-34103-0).
- 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 Commun*, vol. 12, n° 1, p. 235, Jan. 2021, doi: [10.1038/s41467-020-20196-y](https://doi.org/10.1038/s41467-020-20196-y).