



**HAL**  
open science

# CARACTÉRISATION ET MODÉLISATION DE PEIGNES DE FRÉQUENCES KERR DANS DES CAVITÉS LASER BRILLOUIN À FIBRE

Erwan Lucas, Moise Deroh, Bertrand Kibler

► **To cite this version:**

Erwan Lucas, Moise Deroh, Bertrand Kibler. CARACTÉRISATION ET MODÉLISATION DE PEIGNES DE FRÉQUENCES KERR DANS DES CAVITÉS LASER BRILLOUIN À FIBRE. Congrès général Optique de la Société Française d'Optique, Jul 2022, Nice, France. hal-03820914

**HAL Id: hal-03820914**

**<https://hal.science/hal-03820914>**

Submitted on 19 Oct 2022

**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.

# CARACTÉRISATION ET MODÉLISATION DE PEIGNES DE FRÉQUENCES KERR DANS DES CAVITÉS LASER BRILLOUIN À FIBRE

Erwan Lucas<sup>1</sup>, Moïse Deroh<sup>1</sup>, Bertrand Kibler<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne, UMR6303 CNRS-UBFC, 21078 Dijon, France*

erwan.lucas@u-bourgogne.fr

## RÉSUMÉ

Nous étudions une cavité en anneau non réciproque simple et reconfigurable pour générer des peignes de fréquences optiques accordables. Nous démontrons que des peignes cohérents peuvent être obtenus en exploitant finement la rétrodiffusion Brillouin stimulée et le mélange à quatre ondes en cascade dans la cavité à fibre non-linéaire.

**MOTS-CLEFS :** *Peigne de fréquences ; Fibre optique ; Optique non-linéaire ; Laser Brillouin ; Effet Kerr*

## 1. INTRODUCTION

Les sources de peignes de fréquences optiques (PFO), dont le spectre à large bande est constitué de raies discrètes équi-espacées en fréquences, constituent un outil très puissant dans un grand nombre d'applications telles que la métrologie des fréquences optiques, la biologie, l'étalonnage des spectrographes astronomiques, le multiplexage en longueur d'onde, la génération de micro-ondes et la spectroscopie moléculaire [1, 2]. Différentes technologies optiques peuvent être utilisées pour générer de tels PFO, comme les lasers à verrouillage de mode, les méthodes de modulation électro-optiques et par effets non-linéaires dans des résonateurs optiques passifs [1, 3]. Dans cette contribution, nous étudions un nouveau système reconfigurable sur fibre optique, basé sur un laser Brillouin bi-chromatique [4], pour générer des peignes de fréquences par effet Kerr. Nous présentons des études numériques et expérimentales approfondies de la cavité non-linéaire, mettant en évidence le potentiel, la robustesse et les limites de tels systèmes hybrides qui tirent parti des processus de rétrodiffusion Brillouin stimulée et de mélanges multiples à quatre ondes.

## 2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

La Figure 1a présente le montage expérimental basé sur une cavité à fibre non linéaire fermée par un circulateur optique, configuration typique pour les lasers Brillouin [5]. Le principe de fonctionnement du système hybride est illustré en Fig. 1b. Grâce au circulateur, les deux lasers de pompe peuvent circuler librement en sens horaire et ne sont pas soumis à une condition de résonance. Ils engendrent des ondes Brillouin Stokes dans la direction opposée, qui peuvent résonner et s'accumuler pour former des raies laser, qui produisent ensuite une cascade spectrale de mélange à quatre ondes. La configuration de pompage bi-chromatique peut être obtenue par la combinaison de deux lasers continus ou, comme illustré en Fig. 1a, au moyen d'une modulation électro-optique, pour obtenir ici une séparation entre les pompes de 40 GHz. La principale caractéristique de ce système est la possibilité de reconfigurer facilement l'espace spectral du peigne, qui est déterminé par la différence de fréquence entre les deux pompes Brillouin (très supérieur à l'intervalle spectral libre de la cavité).

## 3. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Différentes fibres hautement non linéaires (HNLF) ont été testées pour former la cavité, permettant d'étudier l'impact de la dispersion nette de cavité. Les peignes typiques obtenus dans les régimes de dispersion normal et anormal sont montrés respectivement en Figs. 1d,e. Notons, en particulier, l'impact de la croissance des bandes d'instabilité de modulation spontanée sur les peignes spectraux, survenant dans le régime de dispersion anormale. Les limites de cohérence et de stabilité de cette cavité à double

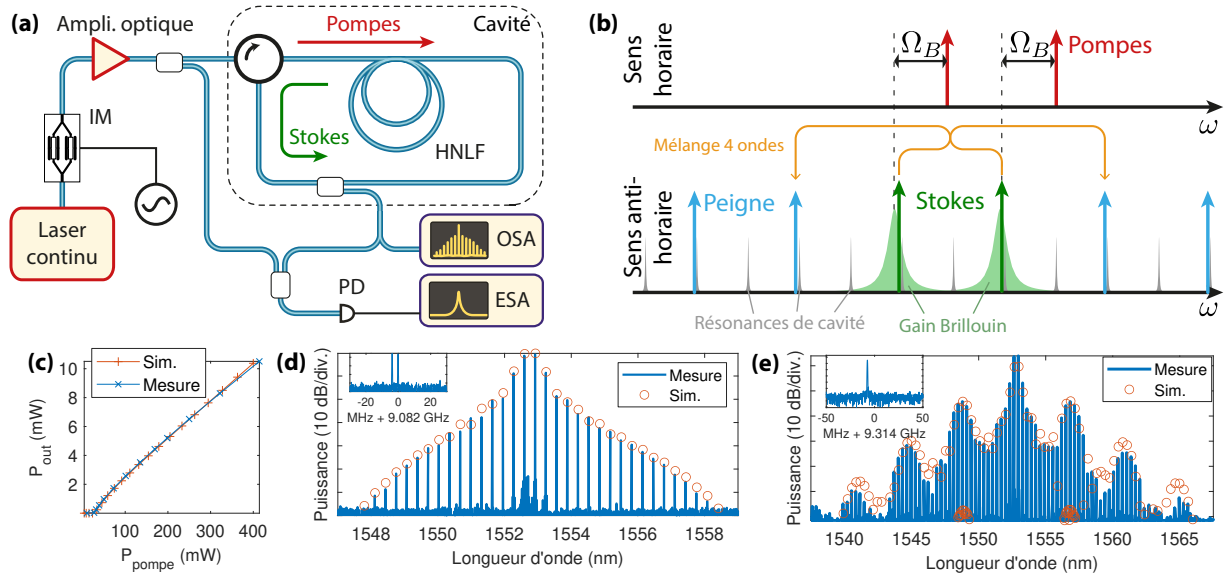


FIGURE 1 – **(a)** Montage expérimental pour la génération de peignes de Kerr dans un laser Brillouin à fibre. IM : modulateur d'intensité ; HNLF : fibre hautement non-linéaire ; OSA : Analyseur de spectre optique ; PD : photodiode ; ESA : Analyseur de spectre électrique. **(b)** Principe de formation des peignes de Kerr dans une cavité laser Brillouin. Les pompes circulant dans le sens horaire ne sont pas résonantes du fait du circulateur. Elles induisent des bandes de gain Brillouin-Stokes décalées de la fréquence des phonons élastiques  $\Omega_B$ , qui provoquent un effet laser sur les modes de résonances de la cavité. Ces deux lasers Brillouin initient alors une cascade de mélange 4 ondes, menant à la formation d'un peigne dont la séparation de raies est contrôlée via l'espacement des pompes. **(c)** Mesure de seuil du laser Brillouin avec une seule pompe (cavité de 15 m) **(d)** Peigne de fréquences obtenu en régime de dispersion normale (cavité de 15 m,  $P_{\text{pompe}} = 230$  mW). Les battements entre les lasers Stokes et leur pompes (centrés autour de  $\Omega_B/2\pi$ ) sont montrés en encart. Ils témoignent d'une excellente cohérence dans ces conditions (résolution 100 kHz). **(e)** Mêmes mesures réalisées en régime de dispersion anormale (cavité de 60 m,  $P_{\text{pompe}} = 180$  mW). Le battement d'un seul laser est montré en encart.

pompe, telles que le saut de mode, seront présentées ainsi que leur réduction par divers schémas de stabilisation tels que le verrouillage de phase du battement pompe-Stokes [5] ou la technique Pound–Drever–Hall (PDH).

Différentes longueurs de cavité ont été utilisées pour vérifier l'impact du régime d'effet laser Brillouin multimode sur le peigne. En effet, malgré la faible largeur du gain Brillouin (typiquement 50 MHz), pour un intervalle spectral libre (ISL) de la cavité plus petit, plusieurs modes peuvent osciller simultanément, surtout à haute puissance. Cette caractéristique de chaque laser Brillouin est suivie en mesurant son battement avec son laser de pompe. Nos observations montrent que les cavités dépassant  $\sim 80$  m oscillent sur plusieurs modes longitudinaux avant l'émergence du peigne. L'oscillation multimode dégrade fortement la cohérence du peigne, et réduit la puissance par ligne et augmente le plancher de bruit.

#### 4. MODÉLISATION

Une modélisation spécifique a été développée pour simuler la génération de peignes de fréquences dans ce type de cavité laser. Le modèle est basé sur un ensemble de trois équations couplées. La première de type Schrödinger non-linéaire (intégration par méthode de Fourier à pas divisés) permet de décrire la propagation non-linéaire des ondes Stokes dans les fibres formant la cavité, la deuxième rend compte de leurs conditions de recirculation et résonance (au niveau du circulateur), et la troisième permet de

déterminer le gain Brillouin en régime stationnaire à introduire dans la première avant chaque tour en fonction de la puissance intracavité et de celle des ondes de pompe.

Les pertes de la cavité sont tout d'abord estimées en boucle ouverte. Cette valeur, ainsi que la valeur du gain Brillouin, sont ajustées pour correspondre à la mesure du seuil laser Brillouin avec une seule pompe (voir Fig. 1c). Malgré l'absence de condition de résonance pour les lasers de pompe, nos comparaisons simulations – expériences ont mis en évidence l'importance de prendre en compte le désaccord résiduel entre le pic de gain et le mode laser, comme observé dans les microrésonateurs [6, 7, 8]. La largeur spectrale du peigne est aussi affectée par le décalage entre la séparation des pompes et l'ISL de la cavité.

Les prédictions numériques correspondent remarquablement aux données expérimentales. Dans le cas d'une dispersion nette normale (Fig. 1d), le peigne se forme par un fort auto-raïdissement de la modulation sinusoïdale issue de la combinaison des deux laser Stokes dans la cavité. Dans le cas d'une dispersion nette anormale (Fig. 1e), le peigne est issu de la formation de structures localisées (par instabilité de modulation) sur chaque sommet de la modulation sinusoïdale. Le léger décalage de la position des lobes du peigne entre la mesure et la simulation est dû à une légère erreur d'évaluation de la dispersion de la fibre. Notons que lorsque le laser Brillouin devient multimode (en augmentant la puissance de pompage, ou la longueur de la cavité), l'accord simulation-expérience se détériore progressivement dû au comportement aléatoire de la cavité.

## 5. CONCLUSION

En conclusion, nos premiers résultats confirment une alternative intéressante aux autres méthodes de génération de peignes de fréquences. Ils apportent également un éclairage nouveau sur les premières études de ces systèmes hybrides, concernant notamment la cohérence du peigne [4, 9]. Une étape d'optimisation de la conception de la cavité est en cours pour maximiser la largeur spectrale du peigne tout en sauvegardant sa cohérence. Enfin, nous travaillons à la transposition de ces résultats dans la bande spectrale autour de 2  $\mu\text{m}$ , qui est davantage appropriée pour la spectroscopie.

## RÉFÉRENCES

- [1] S. A. DIDDAMS, K. VAHALA et T. UDEM. "Optical frequency combs : Coherently uniting the electromagnetic spectrum". *Science* 369.6501 (2020).
- [2] N. PICQUÉ et T. W. HÄNSCH. "Frequency comb spectroscopy". *Nat. Photonics* 13.3 (2019).
- [3] T. J. KIPPENBERG et al. "Dissipative Kerr solitons in optical microresonators". *Science* 361.6402 (2018).
- [4] Q. LI et al. "Optical frequency combs generated by four-wave mixing in a dual wavelength Brillouin laser cavity". *AIP Adv.* 7.7 (2017).
- [5] G. DANION et al. "Mode-hopping suppression in long Brillouin fiber laser with non-resonant pumping". *Opt. Lett.* 41.10 (2016).
- [6] J. LI et al. "Characterization of a high coherence, Brillouin microcavity laser on silicon". *Opt. Express* 20.18 (2012).
- [7] Y. BAI et al. "Brillouin-Kerr Soliton Frequency Combs in an Optical Microresonator". *Phys. Rev. Lett.* 126.6 (2021).
- [8] I. H. DO et al. "Self-stabilized soliton generation in a microresonator through mode-pulled Brillouin lasing". *Opt. Lett.* 46.7 (2021).
- [9] Y. HUANG et al. "Temporal soliton and optical frequency comb generation in a Brillouin laser cavity". *Optica* 6.12 (2019).