



**HAL**  
open science

## Réduction du seuil d'instabilité de modulation d'un résonateur Fabry-Pérot fibré

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

► **To cite this version:**

Germain Bourcier, Safia Mohand Ousaid, Stéphane Balac, Julien Lumeau, Antonin Moreau, et al.. Réduction du seuil d'instabilité de modulation d'un résonateur Fabry-Pérot fibré. Optique Normandie 2024, Jul 2024, Rouen, France. hal-04687221

**HAL Id: hal-04687221**

**<https://laas.hal.science/hal-04687221v1>**

Submitted on 4 Sep 2024

**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.

# Réduction du seuil d'instabilité de modulation d'un résonateur Fabry-Pérot fibré

Germain BOURCIER<sup>1,2</sup>, Safia MOHAND OUSAID<sup>1</sup>, Stéphane BALAC<sup>3</sup>, Julien LUMEAU<sup>4</sup>,  
Antonin MOREAU<sup>4</sup>, Thomas BUNEL<sup>5</sup>, Matteo CONFORTI<sup>5</sup>, Arnaud MUSSOT<sup>5</sup>,  
Olivier LLOPIS<sup>1</sup>, Arnaud FERNANDEZ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LAAS-CNRS, Université de Toulouse, CNRS, UPS, Toulouse, France

<sup>2</sup>CNES, 18 avenue Edouard Belin, F-31401 Toulouse, France

<sup>3</sup>IRMAR, Université de Rennes, CNRS, Campus de Beaulieu, 35042 Rennes, France

<sup>4</sup>Université Aix Marseille, CNRS, Centrale Med, Institut Fresnel, Marseille, France

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

[germain.bourcier@laas.fr](mailto:germain.bourcier@laas.fr)

## RESUME

Dans l'intention de générer des peignes Kerr de fréquences, nous démontrons par une analyse complète la possibilité de réduire de 15.6% la puissance de seuil de déclenchement d'instabilité de modulation dans un résonateur Fabry-Pérot fibré de 7 cm de long.

**MOTS-CLEFS :** *peignes de fréquences optique ; cavité Fabry-Pérot ; optique non-linéaire ; instabilités de modulation*

## 1. INTRODUCTION

Des miroirs diélectriques multicouches de réflectivité identique  $R > 99.8\%$ , de 40 nm de bande-passante et centrés sur 1.55  $\mu\text{m}$ , sont déposés aux extrémités d'un cordon fibré de quelques centimètres ( $\sim 7$  cm) et de dispersion anormale ( $\beta_2 < 0$ ) pour obtenir un résonateur Fabry-Pérot (FP) fibré. Ce type de résonateur présente des avantages significatifs tels que sa facilité de conception et de manipulation, son couplage durable et reproductible et avant tout son facteur de qualité Q pouvant atteindre  $5.10^9$ , (40 kHz de largeur de résonance) et offrir des pertes en transmission de  $\sim 6$  dB dépassant les résonateurs intégrés en  $\text{Si}_3\text{N}_4$  et approchant les résonateurs cristallins à modes de galeries (WGM). Notre FP offre ainsi une alternative prometteuse aux résonateurs en anneau pour la génération de peignes de fréquences. Cependant une puissance de pompe continue  $> 1$  W est généralement nécessaire pour déclencher l'IM et permettre l'initiation d'un soliton de cavité [1,2]. Nous allons montrer qu'il est possible, indépendamment de la valeur de  $\beta_2$ , de réduire cette puissance seuil par le choix approprié de R et du désaccord  $\delta$  (detuning) entre la pompe et la résonance de la cavité froide.

## 2. INSTABILITE DE MODULATION

L'IM est l'un des mécanismes clés sous-jacents à la génération de peignes Kerr basé sur une amplification paramétrique consistant à compenser les effets dispersifs d'ordre 2 par l'auto-modulation de phase (effet Kerr), d'où une dispersion anormale. Les peignes induits par IM ont récemment été étudiés théoriquement [3,4] et expérimentalement [5]. Le seuil de puissance de déclenchement est un indicateur de performance. Il est intéressant d'un point de vue expérimental de minimiser la puissance pompe  $P_{IN}$ , nécessaire pour déclencher le phénomène non-linéaire. Or, bien que cela paraisse contre-intuitif nous allons montrer que le choix d'une réflectivité

$R_{opt} = (2a - 1)/a$  garantissant un stockage intra-cavité maximal [6] n'est pas la solution optimale pour diminuer le seuil de génération d'IM ( $P_{IN,th}$ ). Nous prouverons théoriquement et vérifieront expérimentalement qu'un léger sous-couplage est nécessaire pour atteindre un  $P_{IN,th}$  minimal.

### 3. MINIMISATION DU SEUIL D'INSTABILITE DE MODULATION

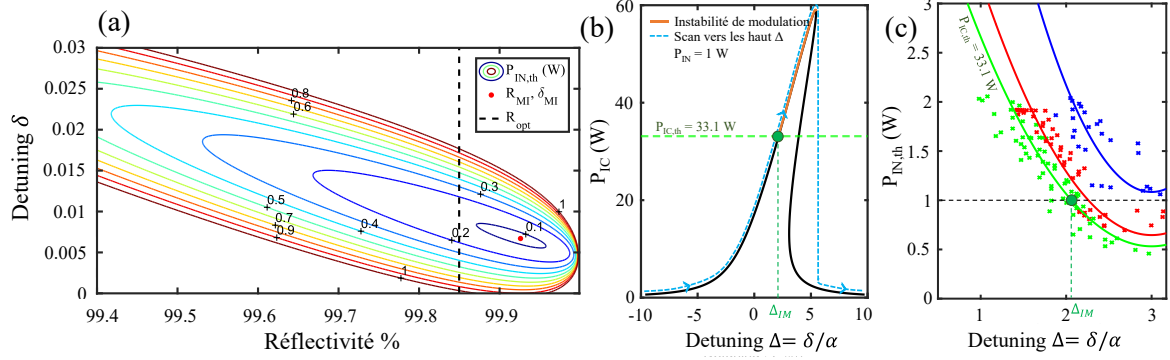


Figure 1 : (a) Tracé du contour de  $P_{IN,th}$  en fonction de la réflectivité des miroirs et du detuning pour des pertes intrinsèques  $a = 0.9985$ . Nous montrons la réflectivité optimale du résonateur en régime linéaire  $R_{opt} = 99.85\%$  (ligne pointillée noir) et le point optimal pour l'IM de réflectivité  $R_{IM} = 99.925\%$  et detuning  $\delta_{IM} = 0.0068$  (point rouge). (b) Fonction de transfert théorique en fonction du detuning normalisé  $\Delta = \delta/\alpha$  où  $\alpha = 1 - aR$  d'un résonateur avec fibre LEAF de 7 cm,  $R = 99.84\%$  et  $a = 0.995$ . Scan vers les hauts  $\Delta$  (pointillés bleus). La région IM est mise en évidence en orange. (c)  $P_{IN,th}$  en fonction du detuning normalisé  $\Delta$  pour trois différents FP avec un couple  $(R, a)$  proche. Les lignes pleines montrent la théorie (Eq. (1)) tandis que les croix sont les données expérimentales. Vert : fibre LEAF ; rouge : fibre HNL ; bleu : fibre SMF28.

Le seuil IM de puissance pompe  $P_{IN,th}$  a été obtenu à partir de l'analyse de stabilité linéaire d'une équation de Lugiato-Lefever généralisée décrivant le comportement non-linéaire du FP en régime de pompage continu. [3]

$$P_{IN,th} = \frac{1-aR}{2L\gamma(1-R)} [(1-aR)^2 + (3(1-aR) - \delta)^2] \quad (1)$$

$P_{IN,th}$  est exprimé en fonction de la longueur de la cavité  $L$ , de la réflectivité en puissance  $R$  des miroirs, des pertes intrinsèques  $a$ , du coefficient non-linéaire  $\gamma$  et du detuning  $\delta$ . Grâce à cette analyse nous pouvons prédire les paramètres idéaux de fabrication du FP pour la génération de peignes de fréquences induits par IM. La figure 1(a) est tracée à partir de l'équation (1) et représente la puissance de seuil en fonction de la réflectivité et du detuning. Elle montre que  $P_{IN,th}$  atteint un minimum pour un unique couple de valeurs  $(R_{IM}, \delta_{IM})$  tel que  $R_{IM} > R_{opt}$  correspondant à un sous-couplage de la résonance linéaire. Ce résultat théorique fait apparaître une différence conséquente dans le processus de fabrication des résonateurs. Notons l'importance du detuning dans l'initiation de l'effet Kerr optique qui engendre via l'auto-modulation de phase un décalage de la résonance vers les basses fréquences sous l'effet de l'augmentation de puissance intra-cavité  $P_{IC,th}$ , figure 1(b). En pratique, il est impératif d'accompagner ce décalage par un balayage du laser de pompe des hautes vers les basses fréquences (pointillés bleus figure 1(b)) afin d'augmenter progressivement la puissance intra-cavité  $P_{IC}$  et atteindre le seuil d'apparition d'IM, dont le detuning correspond à  $\Delta_{IM}$  (point vert figure 1(b, c)).

Nous mesurons expérimentalement ce seuil pour 3 résonateurs composés de fibres monomodes de types HNL, LEAF et SMF28. Les réflectivités et pertes intrinsèques sont sensiblement identiques donnant des finesses d'environ 500 pour les trois résonateurs. Seul le coefficient  $\gamma$  diffère du fait des aires effectives associées au diamètre de mode. Un système expérimental a été mis en place au LAAS composé notamment d'une boucle de stabilisation complexe afin de garantir la stabilité et la précision de la mesure du detuning (Pound-Drever-Hall, PLL optique, séparation de polarisations). Celui-ci a pour but de détecter simultanément la puissance pompe et le detuning lors de l'apparition d'IM. La

figure 1(c) montre le résultat de l'expérience. Pour chacun des trois résonateurs la puissance  $P_{IN,th}$  est exprimée en fonction du detuning normalisé  $\Delta = \delta/\alpha$  où  $\alpha = 1 - aR$  et confirme notamment la présence d'une valeur optimale de detuning pour une réflectivité donnée. Ceci est en parfaite adéquation avec nos prédictions théoriques. Nous montrons aussi un seuil inférieur à 0.6 W pour notre résonateur le plus performant en fibre LEAF laissant supposer des pertes extrinsèques plus fortes à mesure que l'aire effective de la cavité diminue ( $MFD_{SMF} > MFD_{LEAF} > MFD_{HNL}$ ). En effet, les cordons d'accès de la cavité FP sont conçus à base de SMF28, l'injection est donc dépendante du recouvrement des aires effectives.

#### 4. VERS UNE FAIBLE CONSOMMATION D'ENERGIE

Les valeurs seuils minimales obtenues avec des miroirs optimisés pour un résonateur en régime linéaire ( $P_{IN,th}(R_{opt}, \delta)$ ) et en régime non-linéaire ( $P_{IN,th}(R_{IM}, \delta)$ ) peuvent être comparées. L'analyse théorique prédit un ratio  $\frac{P_{IN,th}(R_{IM})|_{min}}{P_{IN,th}(R_{opt})|_{min}} = \frac{27}{32}$  soit une puissance de 15.6% plus basse lorsque le résonateur est optimisé avec le modèle non-linéaire. Ce résultat permet avantagement de profiter d'un facteur de qualité plus fort en sus. Finalement, cette réduction de puissance pompe de 15.6% a deux avantages. Le premier est la diminution de la puissance dans le système fibré limitant ainsi le risque d'endommagement des fibres qui est fréquent à des niveaux de puissance de l'ordre du Watt. Le second est qu'il en résulte la simplification de la chaîne amplificatrice de pompage limitant les sources d'émissions spontanées et pouvant potentiellement ouvrir la voie vers des applications de synthèse microonde de plus faible bruit.

#### CONCLUSION

Pour conclure, nous avons développé une analyse théorique confirmée par l'expérience et destinée à l'optimisation du design des miroirs couches-minces ceci afin de minimiser le seuil de génération de l'instabilité de modulation dans des résonateurs FP fibrés. De cette façon nous avons montré l'existence de paramètres de réflectivité et de detuning idéaux et différents de ceux obtenus par un raisonnement basé sur le fonctionnement en régime linéaire et dédié à la maximisation du stockage intra-cavité. Ces nouveaux paramètres décrits analytiquement à partir de l'équation de Lugiato-Lefever permettent de diminuer de 15.6% la puissance pompe nécessaire à l'obtention de peignes de fréquence par rapport à une optimisation en régime linéaire. Ces résultats sont confirmés par des expérimentations menées sur trois types de cavités fibrées.

**Remerciements :** ce travail a reçu le soutien de l'Agence Innovation Défense et du CNES.

#### RÉFÉRENCES

- <sup>1</sup> M. Nie, K. Jia, Y. Xie, S. Zhu, Z. Xie, and S.-W. Huang, "Synthesized spatiotemporal mode-locking and photonic flywheel in multimode mesoresonators," *Nat Commun* **13**, 6395 (2022).
- <sup>2</sup> T. Bunel, M. Conforti, Z. Ziani, J. Lumeau, A. Moreau, A. Fernandez, O. Llopis, G. Bourcier, and A. Mussot, "28 THz soliton frequency comb in a continuous-wave pumped fiber Fabry-Pérot resonator," *APL Phot.* **9**, 010804 (2024).
- <sup>3</sup> Z. Ziani, T. Bunel, A. M. Perego, A. Mussot, and M. Conforti, "Theory of modulation instability in Kerr Fabry-Perot resonators beyond the mean-field limit," *Phys. Rev. A* **109**, 013507 (2024).
- <sup>4</sup> D. C. Cole, A. Gatti, S. B. Papp, F. Prati, and L. Lugiato, "Theory of Kerr frequency combs in Fabry-Perot resonators," *Phys. Rev. A* **98**, 013831 (2018).
- <sup>5</sup> T. Bunel, M. Conforti, Z. Ziani, J. Lumeau, A. Moreau, A. Fernandez, O. Llopis, J. Roul, A. M. Perego, K. K. Y. Wong, and A. Mussot, "Observation of modulation instability Kerr frequency combs in a fiber Fabry-Pérot resonator," *Opt. Lett.* **48**, 275 (2023).
- <sup>6</sup> A. Yariv, "Universal relations for coupling of optical power between microresonators and dielectric waveguides," *Electronics Lett.* **36**, 321-322 (2000).