

# Micro peignes optiques pour la synthèse de fréquence micro-onde et optique

Germain BOURCIER<sup>1,2</sup>, Stéphane BALAC<sup>3</sup>, Julien LUMEAU<sup>4</sup>, Antonin MOREAU<sup>4</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>CNRS, 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

## Résumé

Nous explorons le résonateur Fabry-Pérot fibré (FFP), une nouvelle plateforme pour la génération de peignes de fréquences. Cette thèse permet d'étudier théoriquement et expérimentalement la génération des peignes. Les instabilités de modulation sont la première manifestation des effets non-linéaires. Une étude analytique relative à leur apparition est présentée ici et est comparée à l'expérience afin de comprendre leur déclenchement, d'améliorer les paramètres de fabrication, et ainsi de réduire la puissance nécessaire à leur génération. Pour aller plus loin, nous considérerons les pertes liées au miroir déposé. Enfin, il est possible de réaliser différents setups pour obtenir des solitons de cavité, la stabilisation par rétro-injection est présentée, celle-ci permet d'obtenir des peignes à très faible bruit de phase.

## Résonateur Fabry-Pérot fibré

Le résonateur Fabry-Pérot fibré (FFP) est délimité par des miroirs diélectriques multicouches de quelques  $\mu\text{m}$  d'épaisseur.

- Facilité de conception et de manipulation
- Couplage durable et reproductible
- $Q > 10^8$

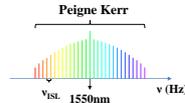


FFP

La biréfringence de la fibre crée une double cavité par la présence de deux polarisations linéaires P1 et P2 d'ISL propre.

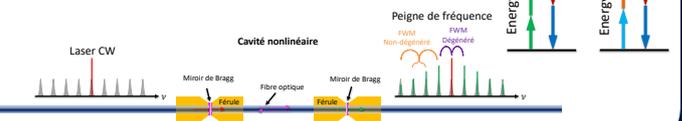
La fibre optique est non-linéaire d'ordre 3 il est donc possible de générer du mélange à quatre ondes.

## Le peigne de fréquence optique



Ensemble de raies fines et équi-espacées obtenu grâce à la génération d'un étalement spectral à l'intérieur d'un résonateur optique.

## Étalement spectral par mélange à quatre ondes



## Théorie et simulation

### Etude de la dynamique de formation du peigne (simulation)

Equation temporelle de Lugiato-Lefever :

$$t_h \frac{\partial \psi}{\partial t} = -(1 - \alpha \rho^2) \psi - i \psi + \kappa E_{in} + 2L \left[ -i \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} + i \gamma |\psi|^2 + i \gamma \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - i \gamma \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} \right] \psi$$

Pertes (blue), Pump (red), Non-linéarité avec co-propagation et contra-propagation (orange), Dispersion (purple), Terme spécifique au FFP (green)

### Seuil d'apparition des effets non-linéaires → Instabilité de modulation

Seuil de puissance input :  $P_{IN,th}$

$$P_{IN,th} = \frac{(1 - \alpha \rho^2)^3}{2LY(1 - \rho^2)} [1 + (3 - \Delta)^2]$$

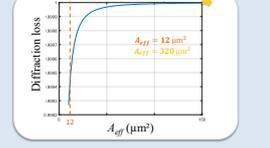
$$R_{MI} = \frac{3\alpha - 1}{2\alpha} \Rightarrow \text{Optimisation de la réflectivité} \rightarrow 15,6\% \text{ de } P_{IN} \text{ en moins}$$

### Simulation des pertes par diffraction dans le miroir

- Approximation du mode fondamental Gaussien
- modèle d'optique de Fourier (fréquences spatiales)
- Calcul des coefficients de Fresnel pour N couches minces (méthode récursive de Rouard)

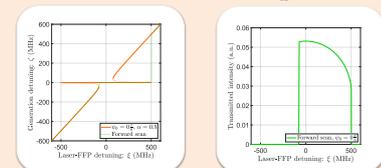
$$\eta = \iint \left( \frac{E_1}{\sqrt{R_1}} \right) \left( \frac{E_2}{\sqrt{R_2}} \right) dx dy$$

Intégrales de recouvrement



### Théorie self-injection locking

Développement d'un modèle théorique :  $\xi = \zeta + \frac{\alpha \kappa}{\tau_{LC}} \mathcal{T}(\zeta) \sin \psi$



## Résultats expérimentaux

### Etude de la dynamique de formation du peigne (expérimentation)

- Signal injecté :  $P = 1W$
- Cavité FP :  $\beta_2 = -5ps^2/km^2$ ,  $\gamma = 1.1kW^{-1}km^{-1}$ ,  $Q = 1.2 \cdot 10^8$
- Seuil puissance intracavité :  $P = 11W$

Instabilité de modulation

- Lobes symétriques
- Lignes supplémentaires par mélange à quatre ondes
- Espacement  $> 1THz \approx 1000 ISL$  (cordon 10 cm)

Validation de la théorie

Mesure des pertes par diffraction

Avec une fibre multimode quasi sans pertes :  $Q = 5.10^9$  ( $R = 99,96\%$ )

Setup self-injection locking

Peigne primaire, Soliton de cavité, Low phase noise, Battement RF

## Conclusion

Ces travaux sur le FFP ont permis de mieux comprendre les verrous technologiques associés à sa fabrication et à son utilisation. Nous savons maintenant améliorer le seuil de déclenchement des peignes en choisissant la réflectivité optimale et en réduisant les pertes au miroir. Les outils nécessaires à la compréhension de la dynamique non-linéaire ont été développés. Différents setups ont été mis en places dont la stabilisation par rétro-injection. Cette méthode permet de générer des solitons de cavité avec des puissances de pompe inférieures à 150 mW ce qui est exceptionnel dans ce type de résonateur. De plus, la dynamique complexe de ce type de setup a été étudiée à l'aide d'un modèle théorique.