

# Résonateurs fibrés à fort Q

Lieu : Université Paris XIII (Paris)

Arnaud Fernandez, Safia-Mohand Ousaid, Olivier Llopis, Andy Cassez, Arnaud Mussot, Yann Kersalé, Jacques Millo



FIBERTech  lille

# Introduction: résonateurs Fabry-Pérot fibrés

## ■ Contexte et enjeux économiques

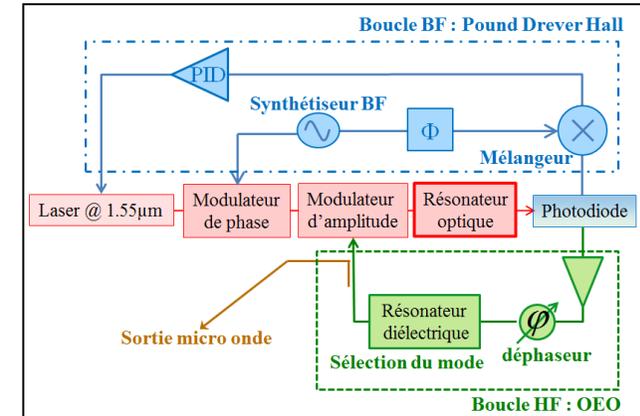
- Densification et performance
  - Systèmes de détection et communication
  - Radars
  - Positionnement/navigation

## ■ Positionnement

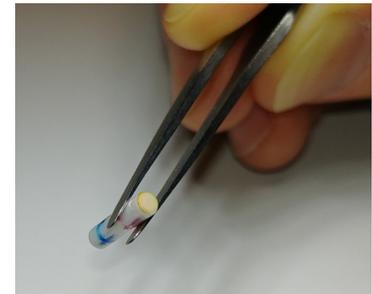
- Source microonde ultra-stable et compacte
- Synthèse de fréquences optiques
- Stabilité (bruit de phase, gigue temporelle)
- Compacité et ergonomie

## ■ Objectif

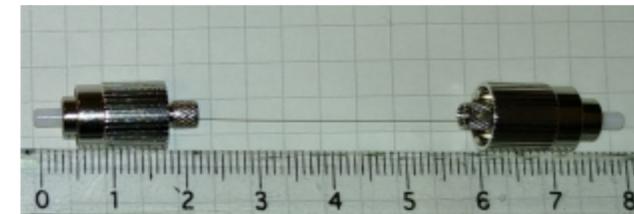
- Composant : Mini résonateur optique fibré optimisé en termes de facteur Q (ou finesse) et stockage de puissance
  - Stratégies de dépôt de miroirs couches minces
  - Choix du guide fibré
  - Recettes de préparation
- Systèmes:
  - Stabilisation de sources laser
  - Oscillateurs optoélectroniques
  - Sources fréquentielles multiples (peignes Kerr de fréquences)



Oscillateur optoélectronique

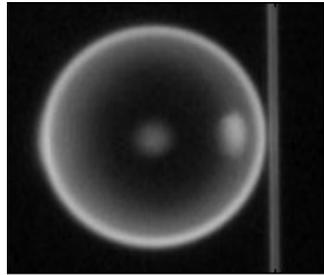


Mini résonateur FP fibré (LAAS)

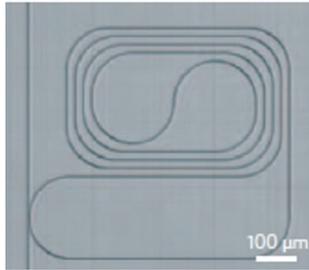


Résonateur FP centimétrique fibré (LAAS)

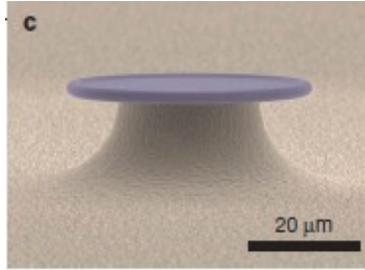
# Avantages vs technologies alternatives



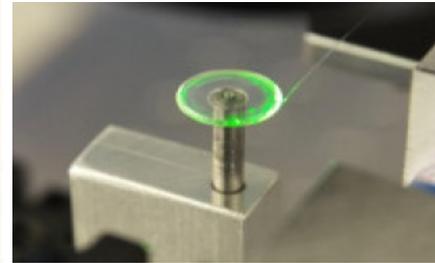
Micro sphère  
[Spillane Nat. 02]



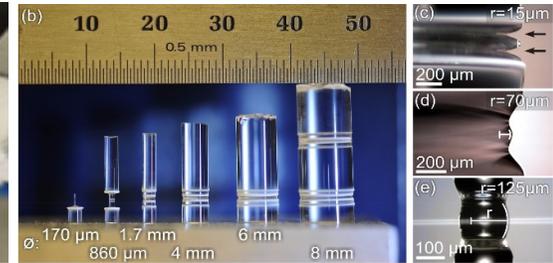
Planaire  $\text{Si}_3\text{N}_4$   
[Moss-Nat Phot. 13]



Tore  
[Del'Haye PRL 11]



Disque  $\text{MgF}_2$   
[Coillet Phot. J. 13]



Barreau quartz poli  
[Del'Haye App. Phys. Lett. 13]

## Intérêt Fabry-Pérot fibré:

- Compact
- Couplage simple et robuste
- Faibles pertes (transparence  $\text{SiO}_2$  et miroirs diélectriques)
- Diversité en matière de fibres optiques
- Monomode ou multimode
- **Non-linéarité modérée**
- Mode optique large : puissance transmise élevée en transmission
  - Régime linéaire :  $Q=5 \cdot 10^9$ ,  $T=-6$  dB, puissance transmise  $> 2$  mW

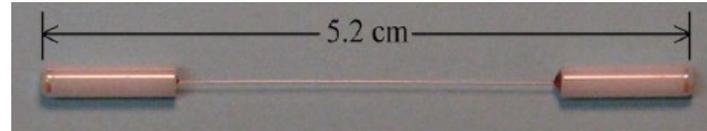
Matériau	Absorption ( $\text{cm}^{-1}$ )
$\text{CaF}_2$	$3 \cdot 10^{-7}$
$\text{SiO}_2$ (silice fondue)	$5 \cdot 10^{-6}$
$\text{Al}_2\text{O}_3$	$1 \cdot 10^{-5}$
$\text{SiO}_2$ (quartz)	$1 \cdot 10^{-5}$
$\text{LiNbO}_3/\text{LiTaO}_3$	$1 \cdot 10^{-4}$
$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Hydex}$	$1 \cdot 10^{-2}$

Matériau	$n_2 \cdot 10^{-16} (\text{cm}^2/\text{W})$
$\text{Al}_2\text{O}_3$	2,8
$\text{CaF}_2$	1,9
$\text{MgF}_2$	0,9
$\text{SiO}_2$ (quartz)	3,4
$\text{SiO}_2$ (silice fondue)	2,6
$\text{LiNbO}_3$	20
$\text{Si}_3\text{N}_4$	25
$\text{As}_2\text{Se}_3$	1200

# Fabry-Pérot fibré: Historique et état de l'art

**NLST**

R=99,9 %  
Finesse=550  
[Braje PRL  
2009]

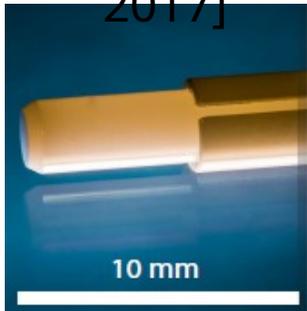


**EPFL**

CLEO'17

R1 (%)	R2 (%)	Layer	Double layers	Fibre	$\delta f_{1/2}$ (MHz)	Pertes intra-cavité (dB)	ISL (GHz)	Q	Finesse	Transmission (dB)	PEF (dB)
99.99	99.99	$\lambda/4$	13	SMF 28	1.3	0.0033	9.8	1.49E+08	7538	-25.24	21.33
99.97	99.97	$\lambda/4$	10	SMF 28	5.9	0.0143	9.77	3.29E+07	1656	-17.57	18.4

[Obrzud Nature  
2017]



## > Un bref historique :

- 2019 Preuve de concept :  $Q=10^7$   $F=500$
- 2020 : Tremplin RTRA :  $Q=10^8$ ,  $F=1000$
- 2021-24 : ANR ASTRID ROLLMOPS
  - Exaltation finesse :  $Q=5 \cdot 10^9$ ,  $F=30 \cdot 10^3$
  - Peignes de fréquences Kerr
  - Systèmes opto-microonde
- 2023-24 : First TF
  - Sources stabilisées
  - Immunité mécanique et thermique



# Miroirs couches minces et diffraction

## Observation de pertes additives quand l'aire effective modale décroît

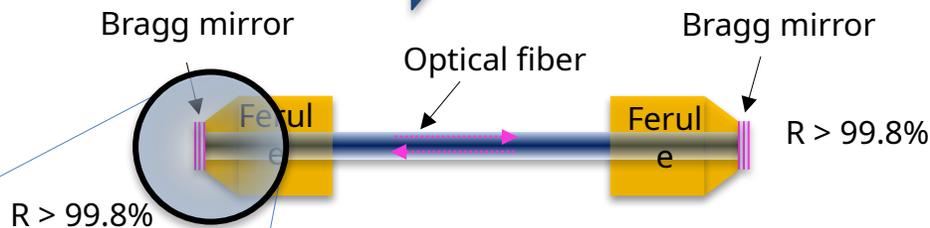
Exemple: Finesse de 600 avec et 2200 avec

### Explication

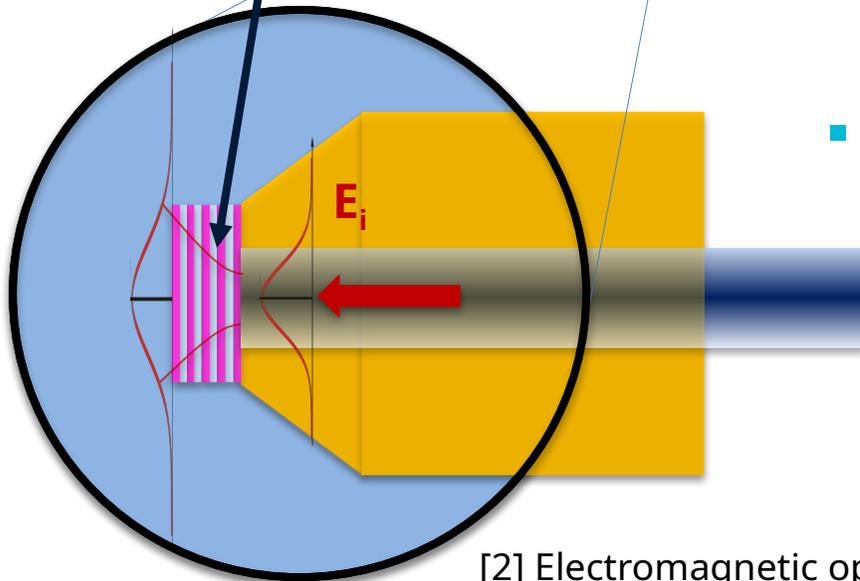
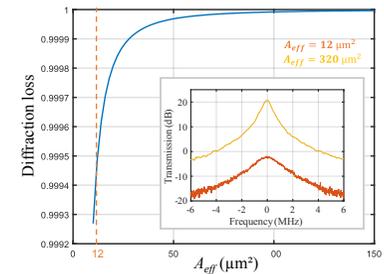
Pas de guidage dans le miroir



Expansion modale



Multimode fiber :  
HNL fiber :



### Simulation

- Approximation d'un mode fondamental gaussien
- Modélisation par l'optique de Fourier (composantes fréquentielles spatiales)
- Calcul des coefficients de Fresnel pour N couches minces (méthode récursive de Rouard [2])

[2] Electromagnetic optics of Thin-Film Coatings, Claude Amra, Michel Lequime, and Myriam Zerrad

# Miroirs couches minces et diffraction

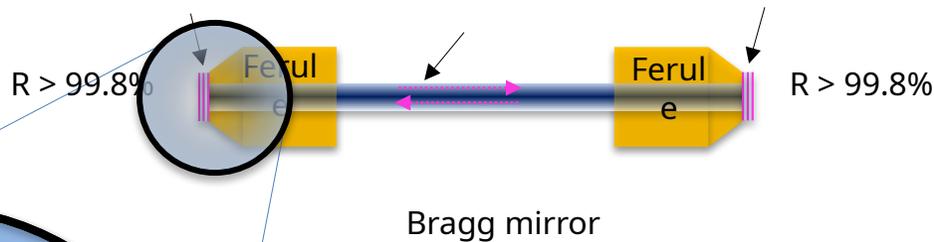
## Observation de pertes additives quand l'aire effective modale décroît

Exemple: Finesse de 600 avec et 2200 avec

### Explication

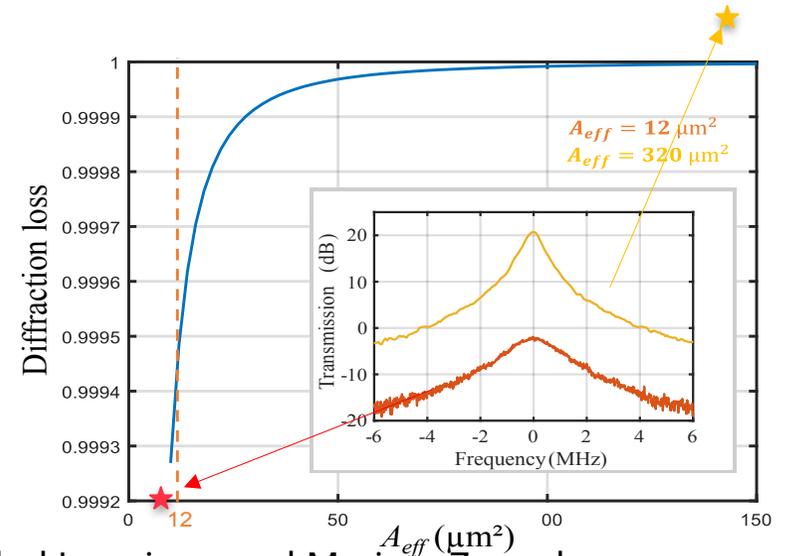
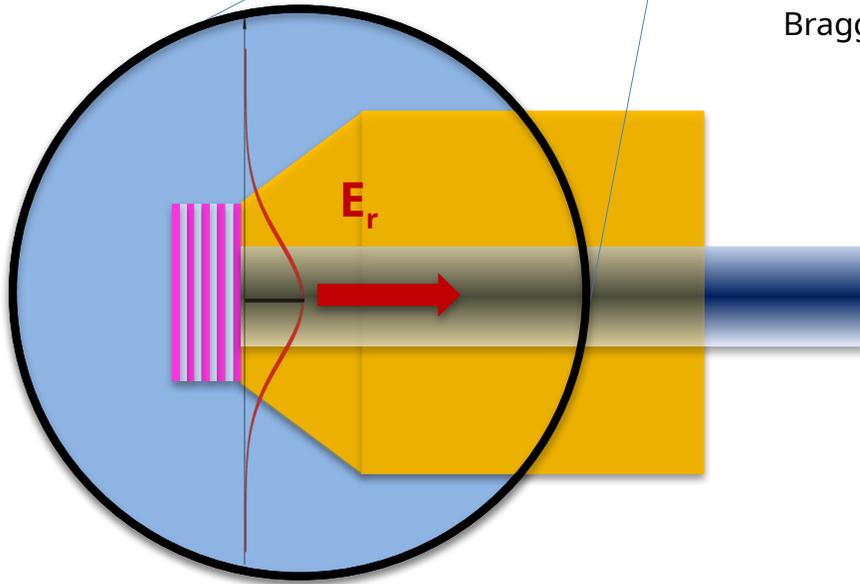
Pas de guidage dans le miroir

Expansion modale



Intégrale de recouvrement

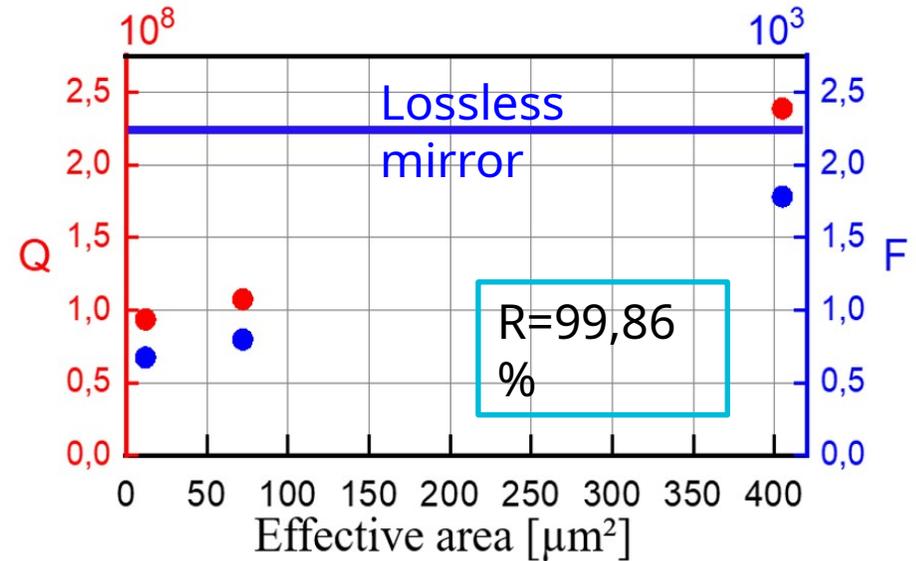
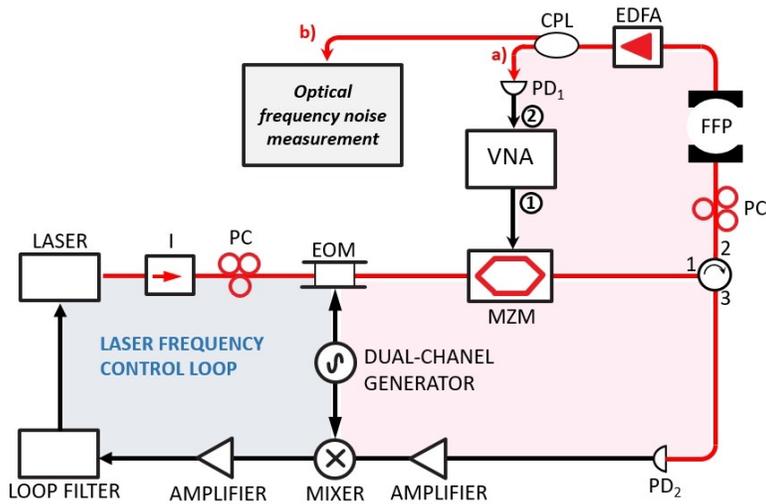
$$\eta = \iint \left( \frac{E_i}{\sqrt{P_i}} \right)^* \left( \frac{E_r}{\sqrt{P_r}} \right) dx dy$$



[2] Electromagnetic optics of Thin-Film Coatings, Claude Amra, Michel Lequime, and Myriam Zerrad

# Finesse et aire effective

## Technique spectro RF



$$\delta f_{1/2} = \frac{c}{2\pi n_g L} a \cos\left(\frac{2aR}{1+(aR)^2}\right)$$

$$T_{max} = \frac{a(1-R)^2}{(1-aR)^2}$$

- Estimation des pertes () et réflectivités ()
- Déduction : Q, F, build-up factor ou power enhancement factor (PEF)

- Confirme que l'effet de diffraction diminue pour une grande  $A_{eff}$
- $T_{dB} > -2$  dB, réflectivité plus forte accessible

# Résonateurs multimodes

## > Performance à l'état de l'art

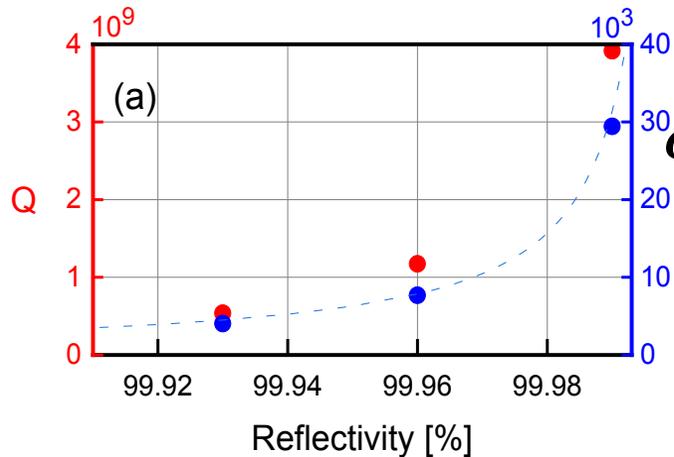
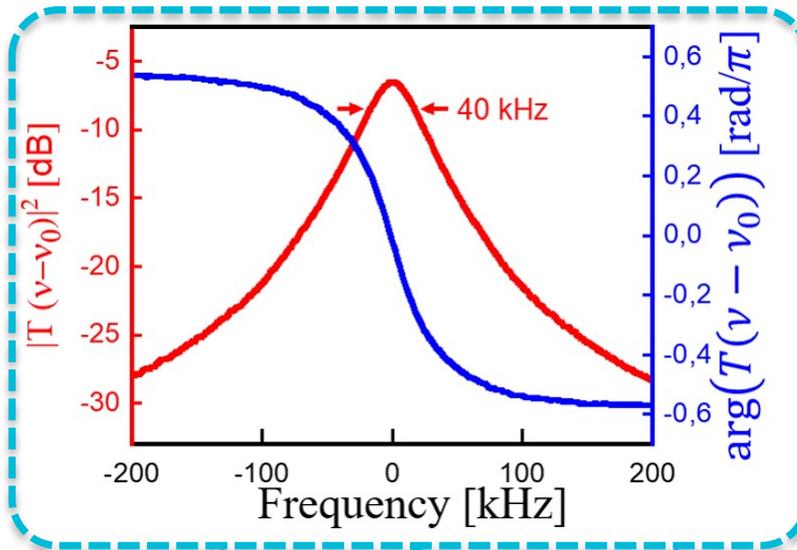
- Fibre multimode adaptée à la montée en finesse
- Mais très multimodale
  - Sensibilité environnementale
  - Packaging nécessaire

$$F_{int} = 1,1 \cdot 10^5$$

$$T_{MAX} = -6 \text{ dB}$$

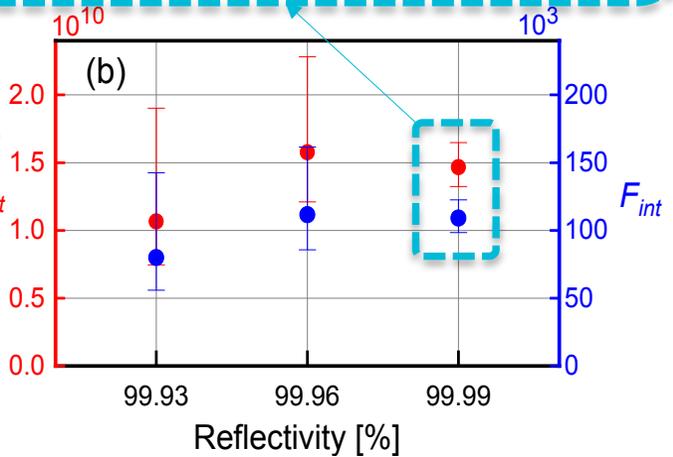
$$35 \text{ dB}$$

$$> 300 \text{ m}$$



$$\delta f_{1/2} = \frac{c}{2\pi n_g L} \frac{(1 - aR)}{\sqrt{aR}} Q_{int}$$

$$Q_{int} = -(2\pi n_g \nu_0 L) / (c \ln a)$$

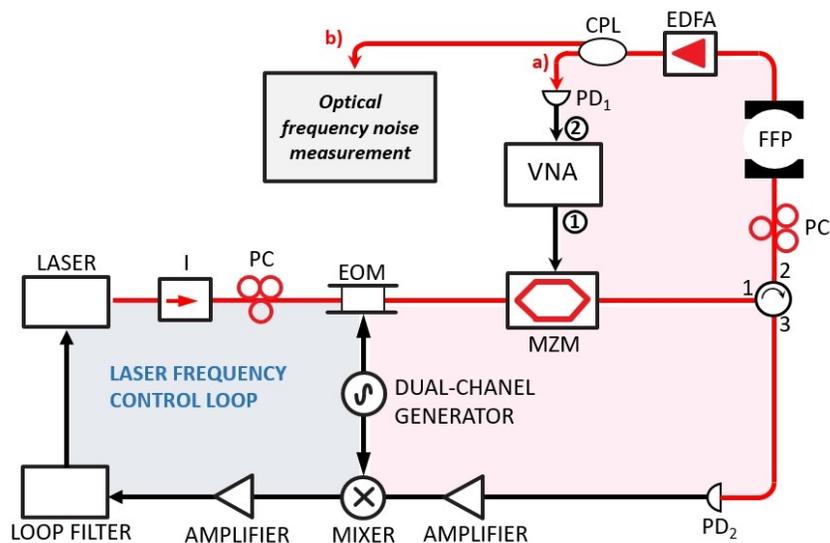


$$Q^{-1} = Q_{ext}^{-1} + Q_{int}^{-1}$$

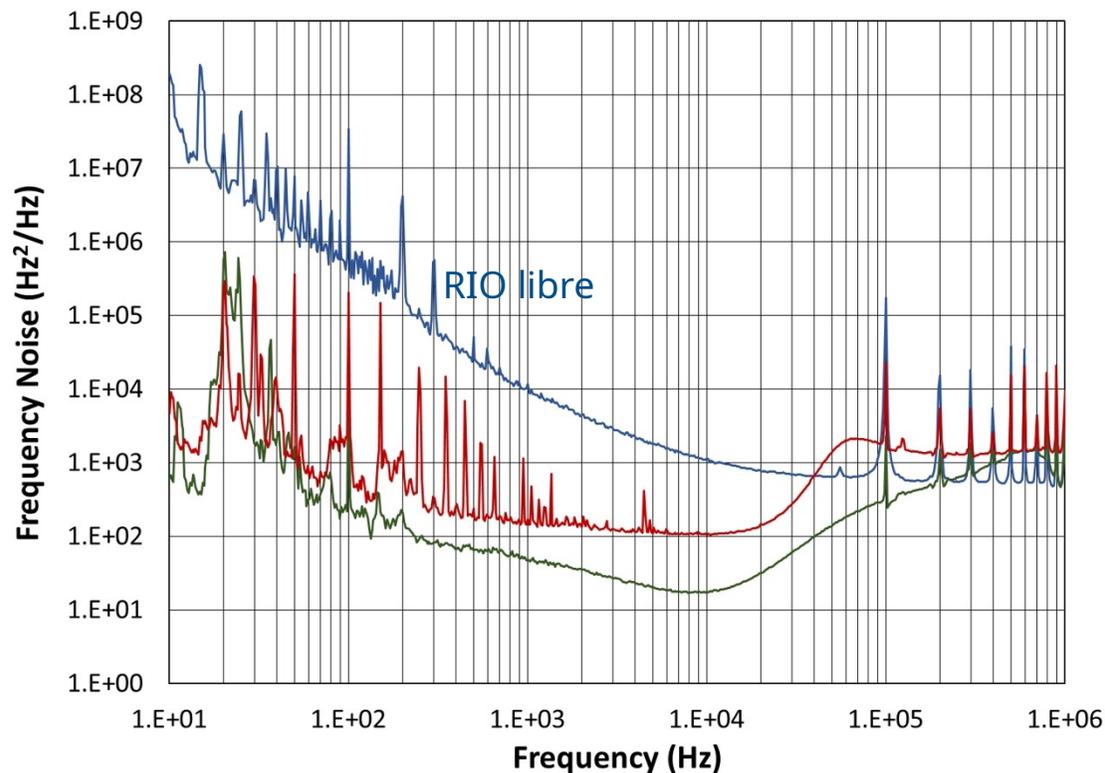
## > Deux approches pour le verrouillage de fréquence laser – résonateur

- **1) Verrouillage électronique (Pound-Drever-Hall)**
  - PDH limité en bande de verrouillage (10 kHz à 100 kHz typique)
  - Stable sur le long terme
  
- **2) Verrouillage optique (self-injection locking)**
  - Sans équivalent pour le gain et la bande de verrouillage
  - Système compact, mécaniquement et thermiquement stable nécessaire

## 1) Verrouillage électronique (Pound Drever Hall)



Laser RIO (cavité externe) verrouillé sur deux résonateurs fêrulle FFP (SMF et MMF)

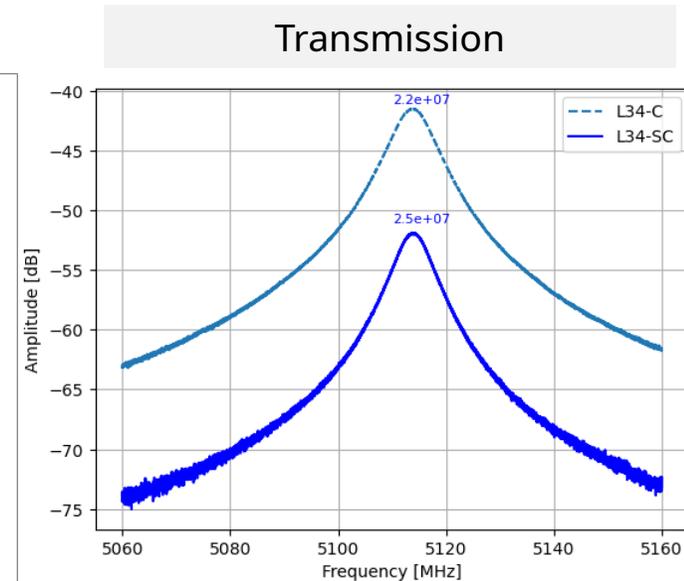
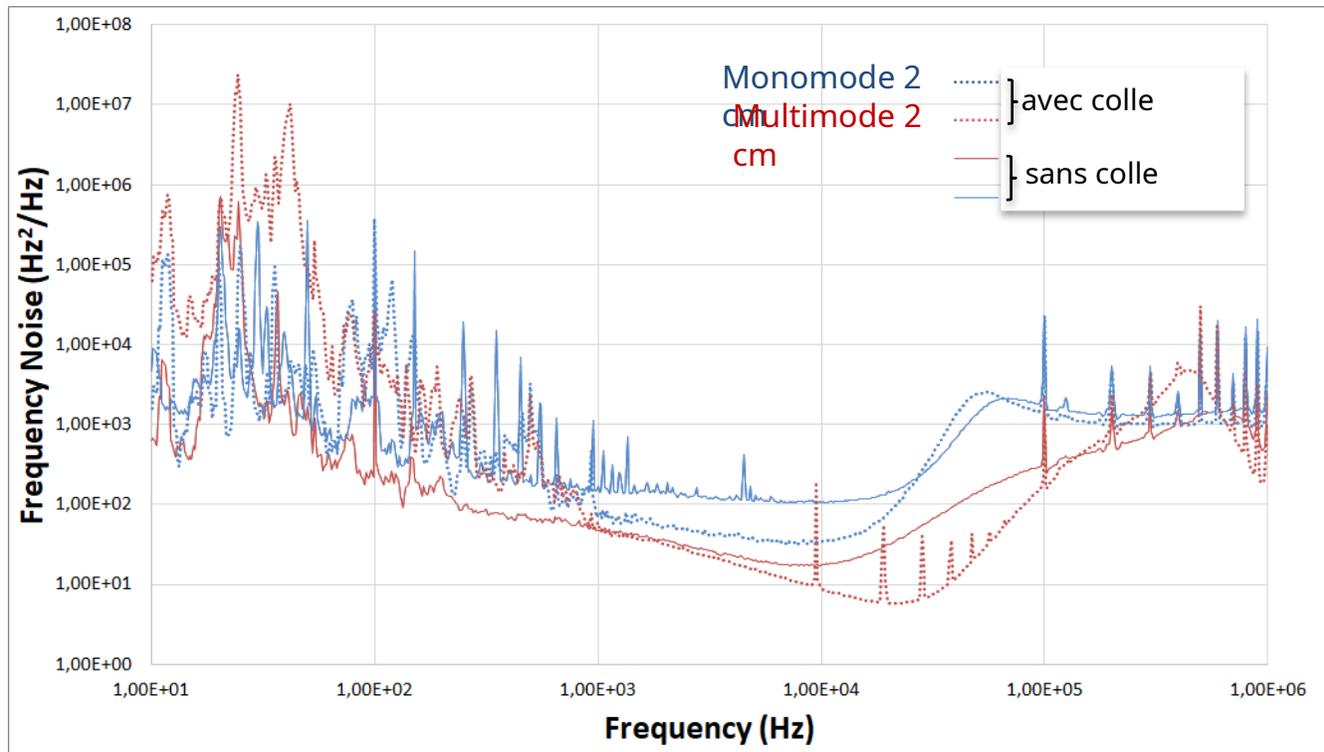


**RIO verrouillé SMF FFP  $Q = 4 \cdot 10^7$**   
**RIO verrouillé MMF FFP  $Q = 6 \cdot 10^8$**

	FSR (GHz)	L (dB)	$\Delta f_{3dB}$ (MHz)	$Q_L$	$Q_o$	Finesse (int.)
2 cm SMF	5.11	-13.9	5.13	$3.8 \cdot 10^7$	$4.7 \cdot 10^7$	1250
2 cm MMF	5.08	-3.3	1.01	$1.9 \cdot 10^8$	$6.1 \cdot 10^8$	15950

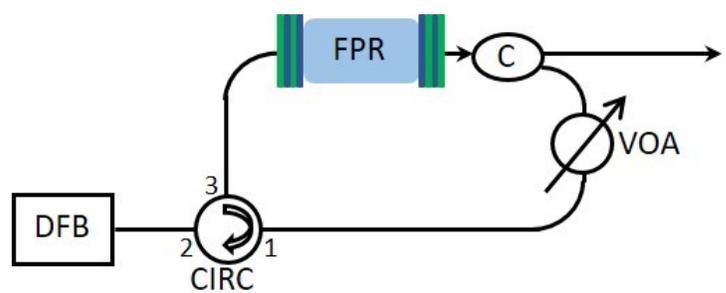
# Laser de haute pureté spectrale

- > Limitation des vibrations connecteur-résonateur par collage

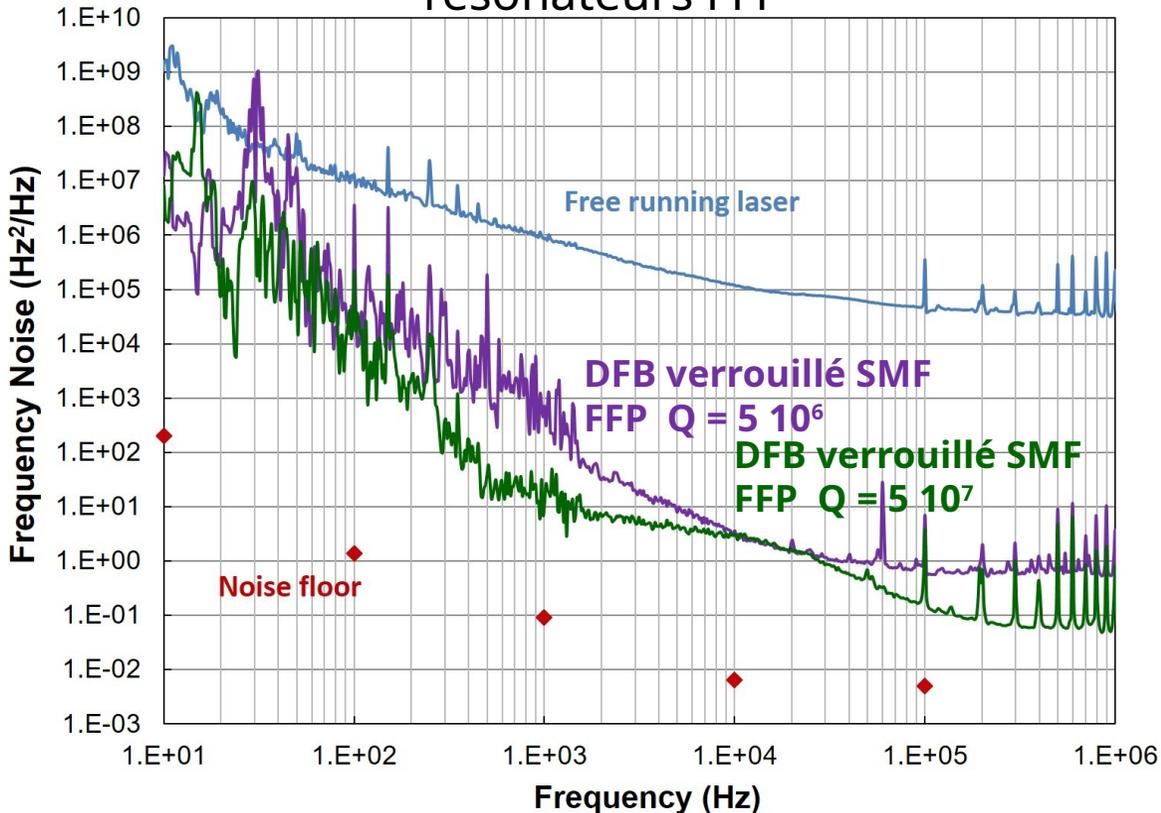


- Plus stable
- Meilleure transmission

## 2) Verrouillage optique

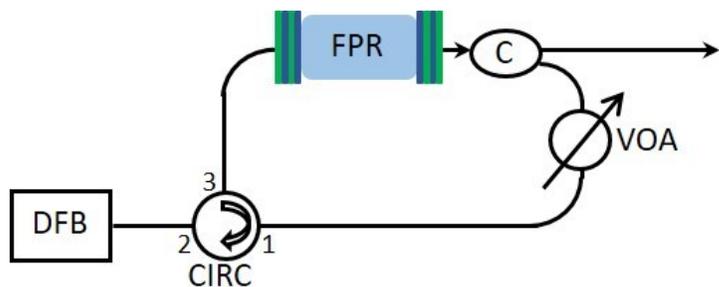


Laser DFB sans isolateur Gooch&Housego verrouillé par self-injection sur deux résonateurs FFP

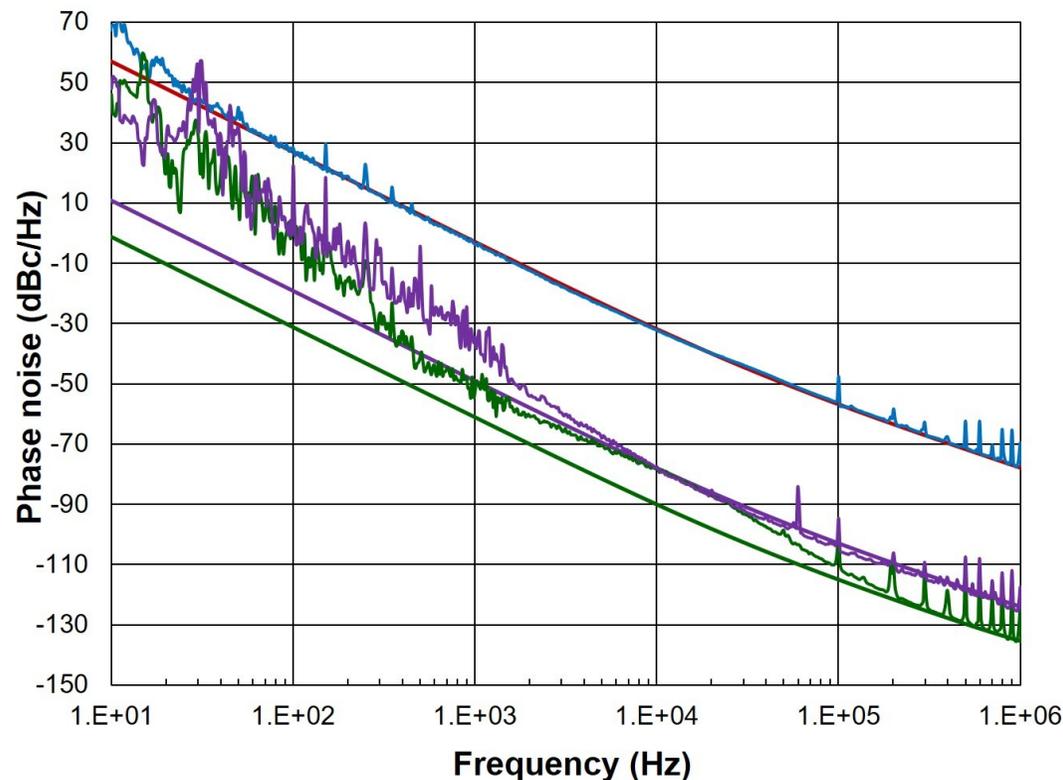


	FSR (GHz)	L (dB)	$\Delta f_{3dB}$ (MHz)	$Q_L$	$Q_o$	Finesse (int.)
1 cm Ferrule	10.29	-4.4	38	$5 \times 10^6$	$1.3 \times 10^7$	690
2 cm Ferrule	5.11	-12.5	4.0	$4.8 \times 10^7$	$6.3 \times 10^7$	1660

## 2) Verrouillage optique



$$S_{\varphi locked}(f) = \frac{1 + 4 \left( \frac{f}{\nu_0} \right)^2 Q_r^2}{\left( 1 + \rho \frac{Q_r}{Q_{laser}} \right)^2 + 4 \left( \frac{f}{\nu_0} \right)^2 Q_r^2} S_{\varphi free}(f)$$



Emploi du bruit de phase pour le calculer la **largeur de raie intégrale**

$$\int_{\frac{\Delta\nu}{2}}^{\infty} S_{\varphi}(f) df = 1 \text{ rad}^2$$

le meilleur des deux lasers :  $\Delta\nu_{int} = 400 \text{ Hz}$  (à partir des données brutes)  $\Delta\nu_{int} = 50 \text{ Hz}$  (à partir du modèle)

## Etat de l'art



### Low phase noise self-injection-locked diode laser with a high-Q fiber resonator: model and experiment

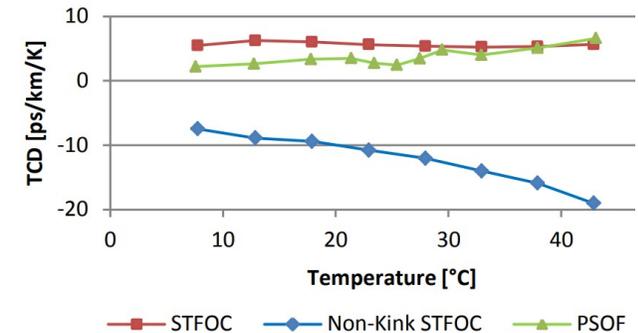
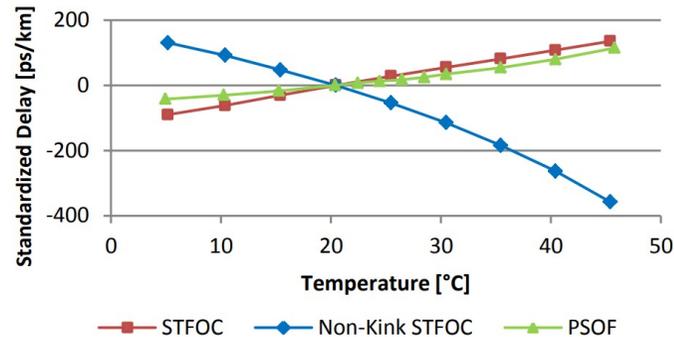
SAFIA MOHAND OUSAID,<sup>1</sup> GERMAIN BOURCIER,<sup>1,2</sup> ARNAUD FERNANDEZ,<sup>1</sup> OLIVIER LLOPIS,<sup>1,\*</sup> JULIEN LUMEAU,<sup>3</sup> ANTONIN MOREAU,<sup>3</sup> THOMAS BUNEL,<sup>4</sup> MATTEO CONFORTI,<sup>4</sup> ARNAUD MUSSOT,<sup>4</sup> VINCENT CROZATIER,<sup>5</sup> AND STÉPHANE BALAC<sup>6</sup>

	Resonator Technology	Locking technique	Freq noise @ 100 Hz (Hz <sup>2</sup> /Hz)	Freq noise @ 1 kHz (Hz <sup>2</sup> /Hz)	Freq noise @ 10 kHz (Hz <sup>2</sup> /Hz)	Freq noise @ 100 kHz (Hz <sup>2</sup> /Hz)
First TF	Fiber Fabry Perot	Optical self injection	10 <sup>4</sup>	10	2	0.08
Hao et al. Nanjing University Optics Letters 2021	Fiber Fabry Perot	Optical self injection	5 10 <sup>4</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>2</sup>	50
Savchenkov at al. OEwaves JQE 2022	Crystalline WGM	Optical self injection	30	3	2	0.4
Liang et al. OEwaves Nature Com 2015	Crystalline WGM	Optical self injection	4	1	0.3	0.2
Xiang et al. Univ. of California Nature com. 2021	Integrated SiN ring	Optical self injection	2 10 <sup>4</sup>	2 10 <sup>3</sup>	10 <sup>2</sup>	10
Jin et al. Univ. of California Nature Phot 2021	Integrated SiN ring	Optical self injection		5 10 <sup>3</sup>	50	10
First TF	Fiber Fabry Perot	PDH	200	50	20	300
Liu et al. Univ. of California Optica 2022	4 m integrated SiN coil	PDH	2	0.4	0.1	0.1

## > Fabry-Pérot à base de fibre dans un package athermalisé

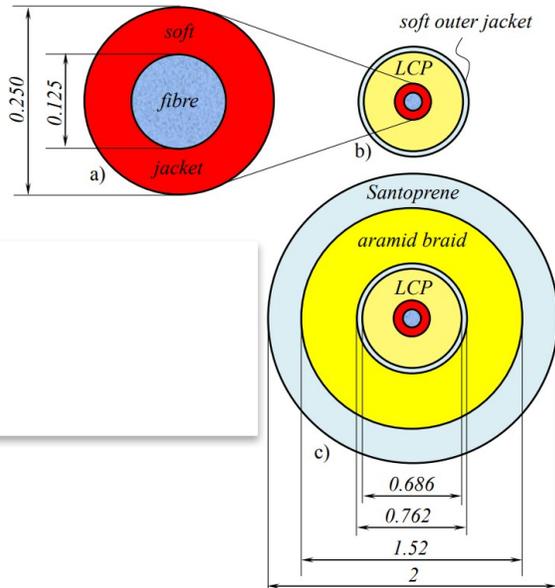
### ■ Conception de cordons FP à base de fibres Linden

- STFOC : cordon à faible coefficient de dilatation
- Non kink STFOC : cordon à coefficient de dilatation négatif



- Résonateurs fabriqués
- Gaine n'altère pas la qualité des dépôts de miroirs
- Mesure de bruit de fréquence à venir

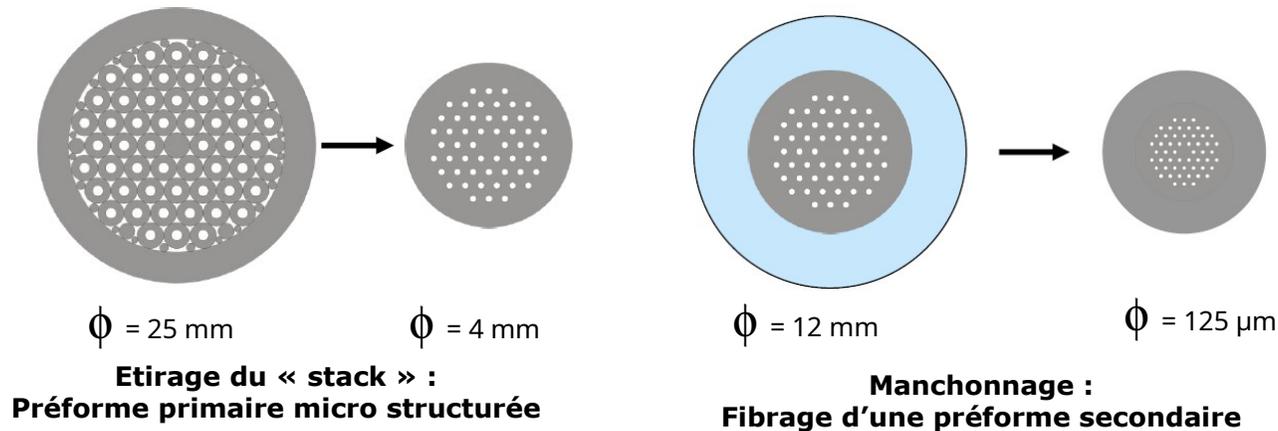
[LPI Cables Catalog](#)  
[2023.pdf \(lindenphotonics.com\)](#)  
[New Phase Stable Optical Fibre \(cern.ch\)](#)



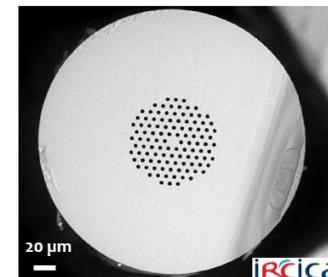
LCP : liquid crystal polymer ,  
 Aramid : fibre synthétique (polymères thermoplastiques)  
 Santoprene : caoutchouc (élastomères thermoplastiques)

## > Conception fibre micro structurée ULE monomode

### ■ Mise en œuvre



**Préforme primaire micro structurée**



**Fibre micro structurée**

### ■ Etat d'avancement

- Approvisionnement de mini-préformes ULE (150x25 mm)
- Soudure inter préformes ULE
- Perçage préformes (en cours)

# Résonateurs fibrés à fort Q

Lieu : Université Paris XIII (Paris)

Arnaud Fernandez, Safia-Mohand Ousaid, Olivier Llopis, Andy Cassez, Arnaud Mussot, Yann Kersalé, Jacques Millo

