

Réduction du bruit d'intensité et du bruit de fréquence par effet de cascade dans un laser Brillouin multi-Stokes

Schadrac Fresnel ^{1, 2}, Stéphane Trebaol ¹, Christelle
Pareige ¹, Pascal Besnard ¹, Sophie LaRoche ²

(1) FOTON, CNRS UMR 6082, ENSSAT, Lannion, France

(2) COPL, Université Laval, Québec, Canada

Développement de sources lasers cohérentes

Capteurs

Télécommunications cohérentes

Photonique microonde

Projet FUI Solbo : **Sources Laser Brillouin cohérentes à faible bruit**

IDIL

Keopsys

Thalès

Foton

EVC

Perfos

Mars 2016 → Mars 2019

Objectifs :

→ Développer un laser à fibre Brillouin en configuration résonante

→ Technologies silice et chalcogénure ($g_b \approx 100 g_B \text{silice}$)

Intérêt du processus Brillouin

- Réduction du bruit d'intensité

A. Debut *et al.* Phys. Rev. A **62** (2) pp. 023803 (2000)

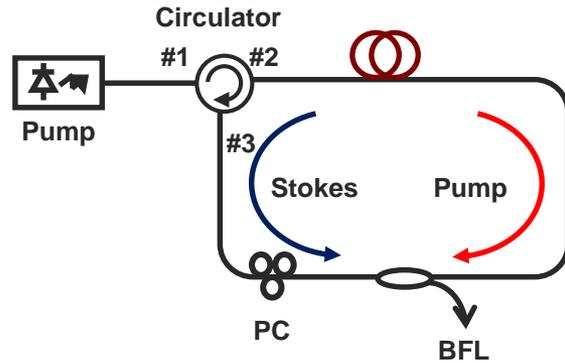
- Réduction de la largeur de raie

L. Stepien *et al.* JOSA B **19** (5) pp. 1055 (2002)

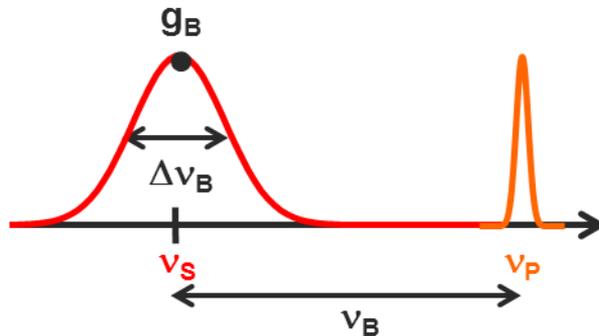
Bruit d'intensité	<-130 dBc/Hz
Largeur de raie	<1kHz
Puissance	≈ mW
Accordabilité	1 nm (@1550 nm)
Seuil laser	<100 μW

Intérêt de la cavité résonante versus simple passage

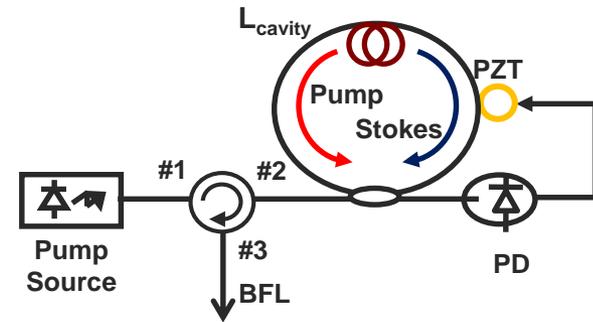
Pompage non résonant



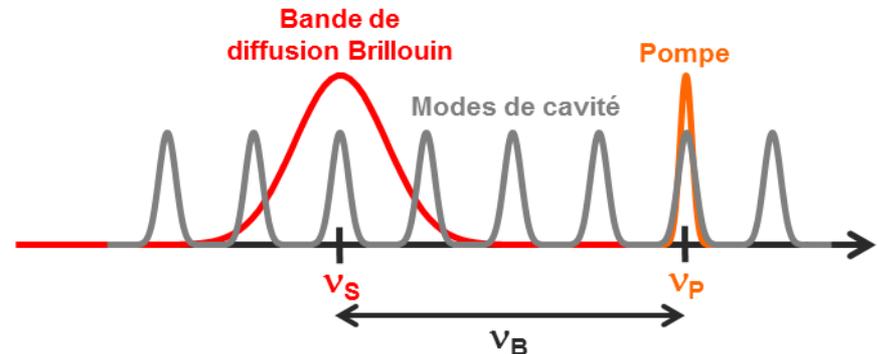
- Le signal de pompe : simple passage dans la boucle
 - Seuil laser relativement haut



Pompage résonant



- Les ondes pompe et Stokes recirculent dans la cavité (résonance)
- Possibilité d'un seuil laser relativement bas



Laser Brillouin en cavité à fibre silice

- fonctionnement en régime multi-stokes

Mesures et Résultats

- Caractérisation en puissance
- Caractérisation du bruit d'intensité
- Caractérisation du bruit de fréquence

Conclusion

Condition laser en cavité

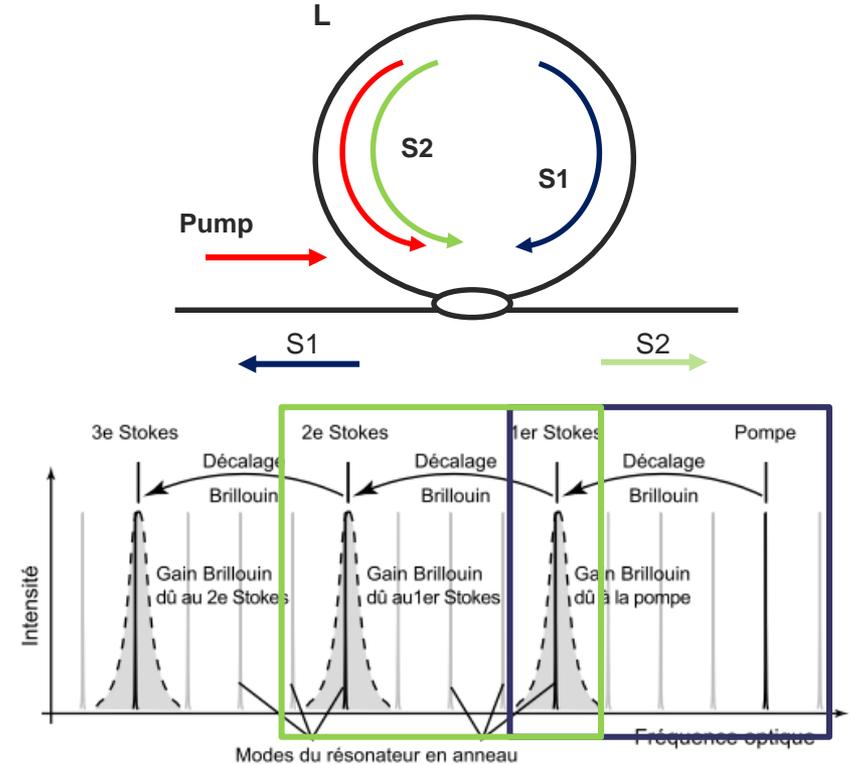
Le gain Brillouin = pertes optiques:

$$k \times \exp(g_B L I_p - \alpha L) = 1$$

k : coefficient de transmission en intensité

α : coefficient de perte en intensité (anneau)

I_p : intensité du signal de pompe



○ Au seuil $I_p = I_{cr}$

Puissance de pompe clampé ->
Transfert par émission stimulée de photons de pompe au Stokes 1

○ Lorsque $I_{S1} = I_{cr}$

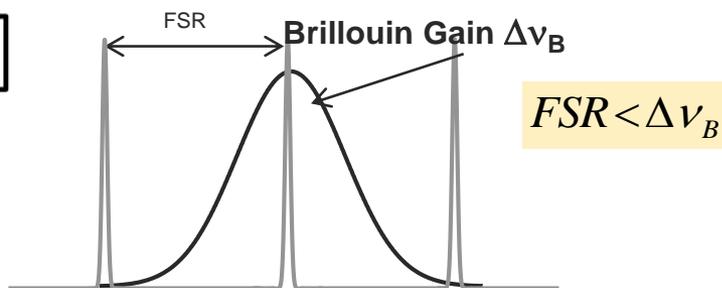
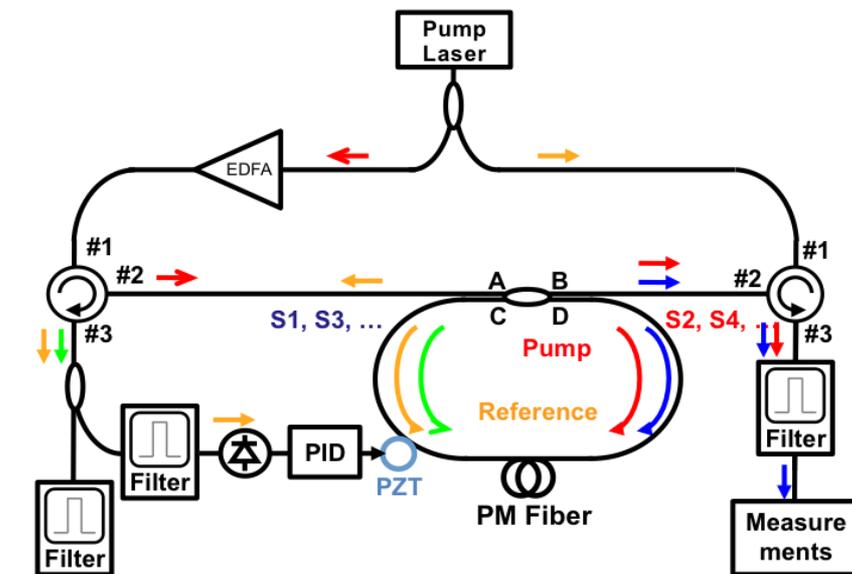
Seuil laser du Stokes 2 atteint → processus en cascade

$$k \times \exp[g_B L (I_p - I_{S2}) - \alpha L] = 1$$

K. Toyama et al. 9th Optical Fiber Sensors Conf. Florence Italie (1993)

A. Küng PhD Thesis EPFL Suisse (1997) (Figure extraite)





Fonctionnement
monomode

Laser de pompe

Kohéras ajustik

Puissance : 500 mW (ampli)

Largeur de raie : 4,1 kHz

La cavité

Finesse : 30

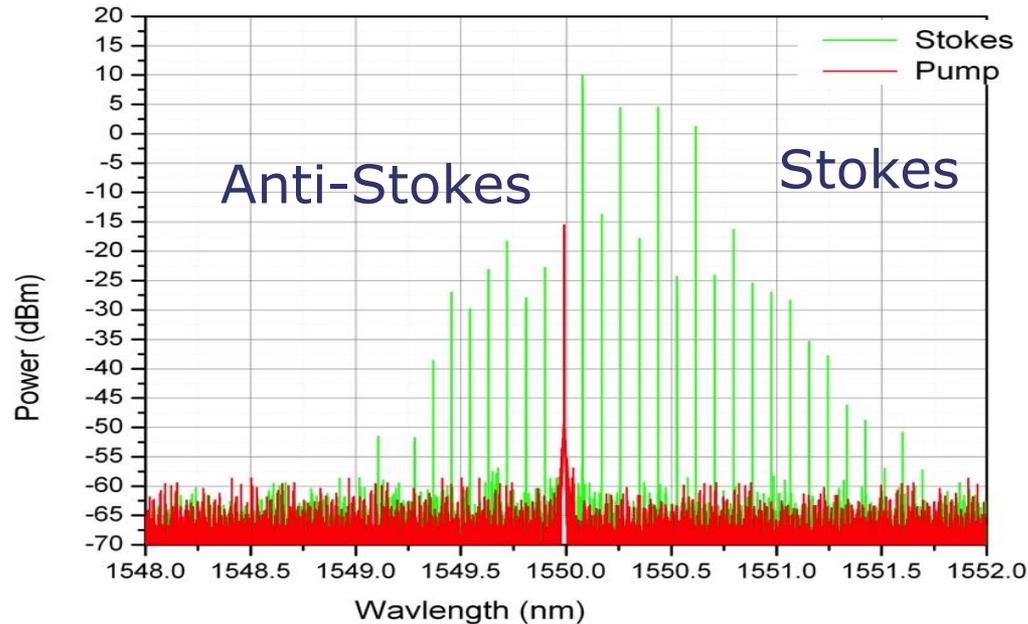
ISL : 12,5 MHz

Largeur de raie : 420 kHz

Fibre : silice PM

Périmètre : 16 m

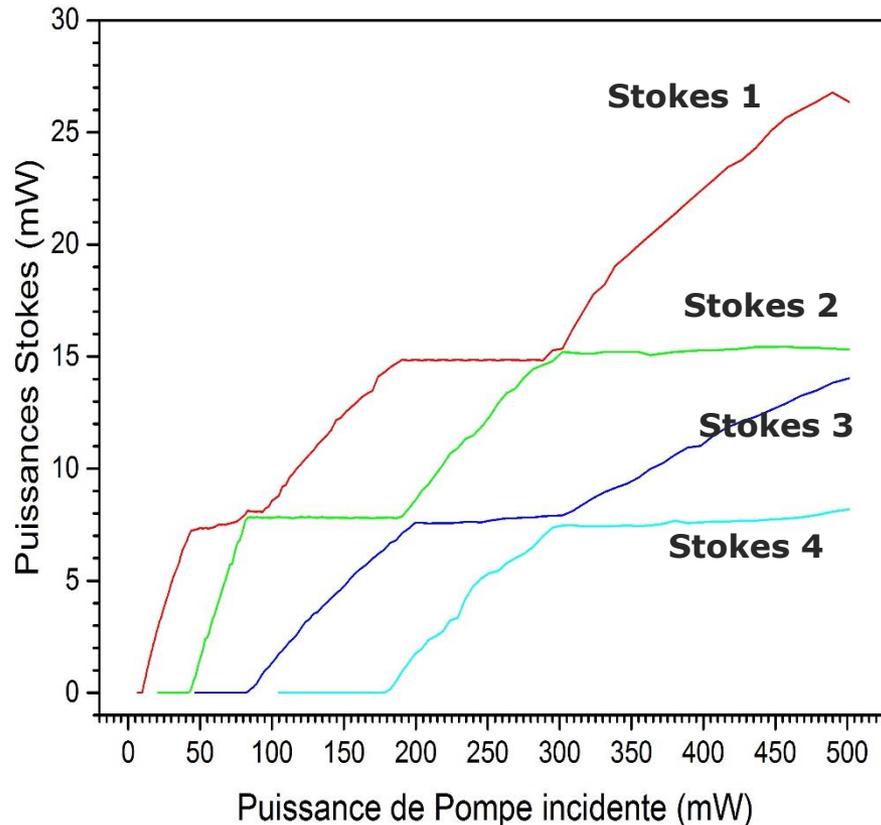
Asservissement: conserver les ordres Stokes résonant avec la pompe



Environ 15 ondes Stokes (et 7 ondes anti-stokes) obtenus pour une puissance de pompe de 500 mW

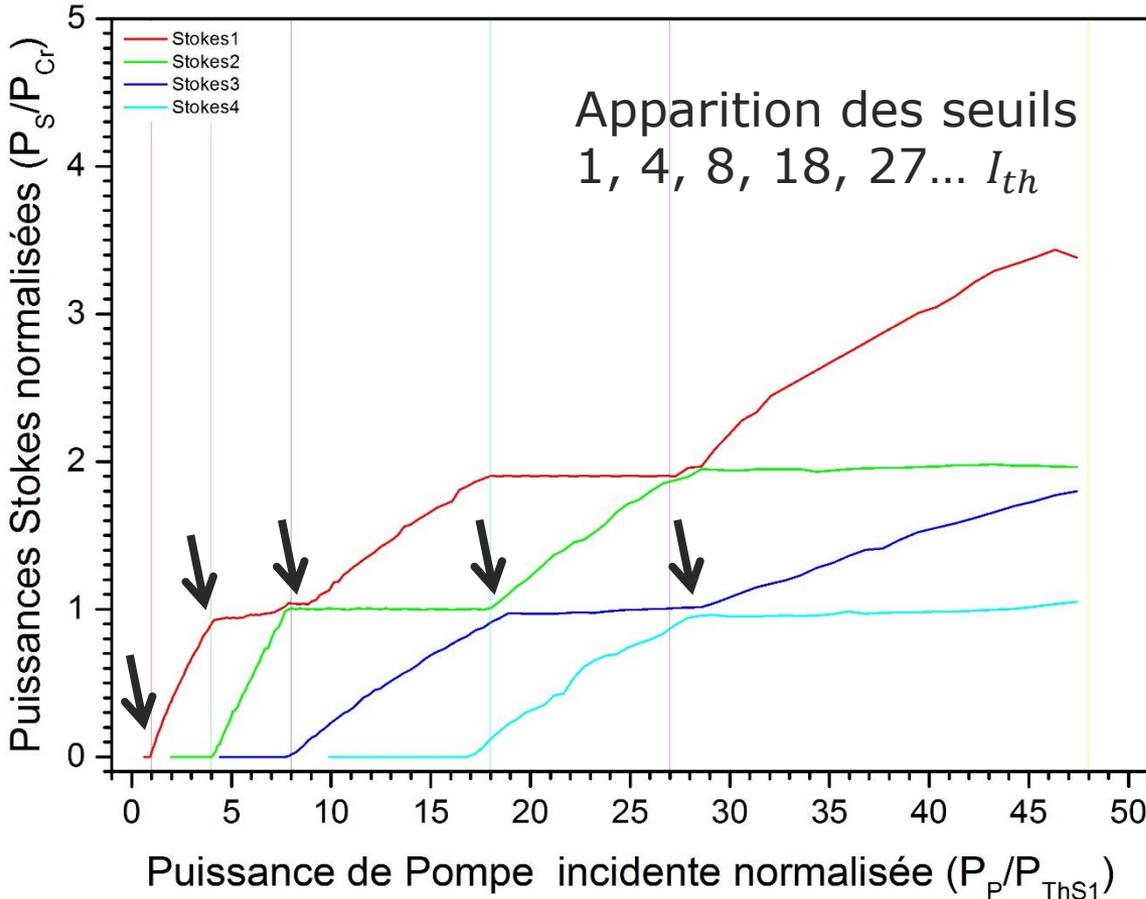
Objectifs :

- Caractérisation en puissance du fonctionnement multi-stokes
- Caractérisation des bruits d'intensité (S1,S2,S3)
- Caractérisation des bruits de fréquence (S1,S2,S3)



- Puissance de sortie S1 → 25 mW
@Pp=500 mW
- Puissance de saturation = puissance seuil de pompe pour générer un ordre stokes
- Efficacité dans la première fenêtre Brillouin → 20 % (~couplage critique)

Puissance seuil du S1=10,5 mW versus 115 mW (cavité non résonante)



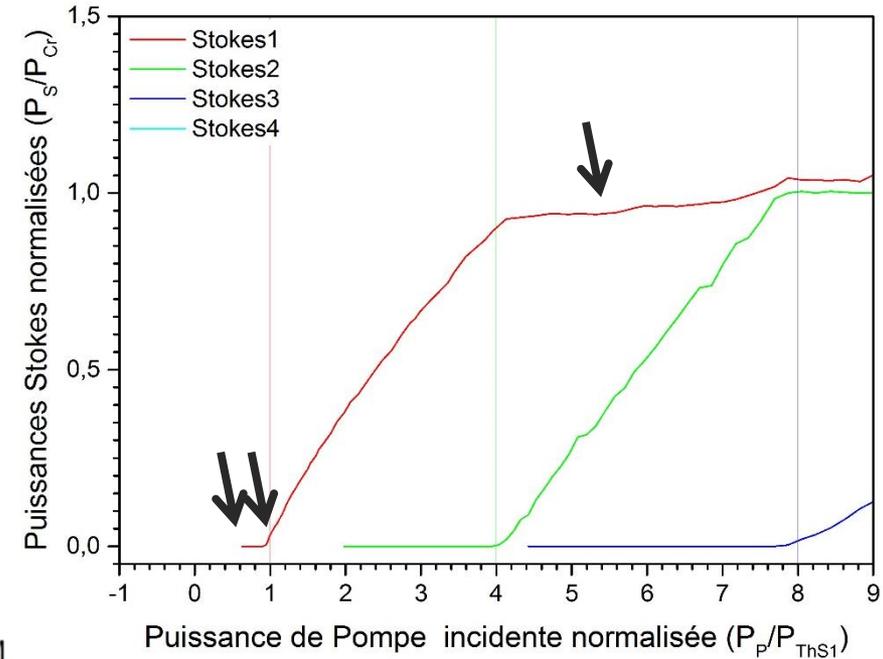
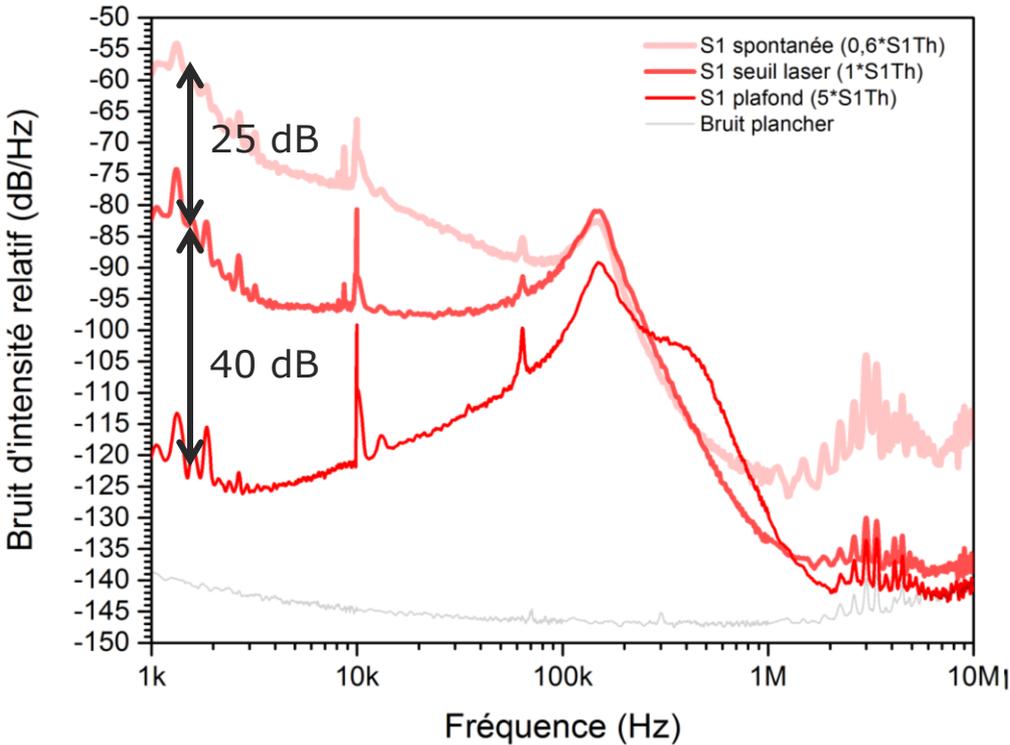
Puissance seuil Stokes

Pour N impairs :

$$P_{ThSN} = P_{ThS1} \left(\frac{N}{2} + \frac{1}{2} \right)^3$$

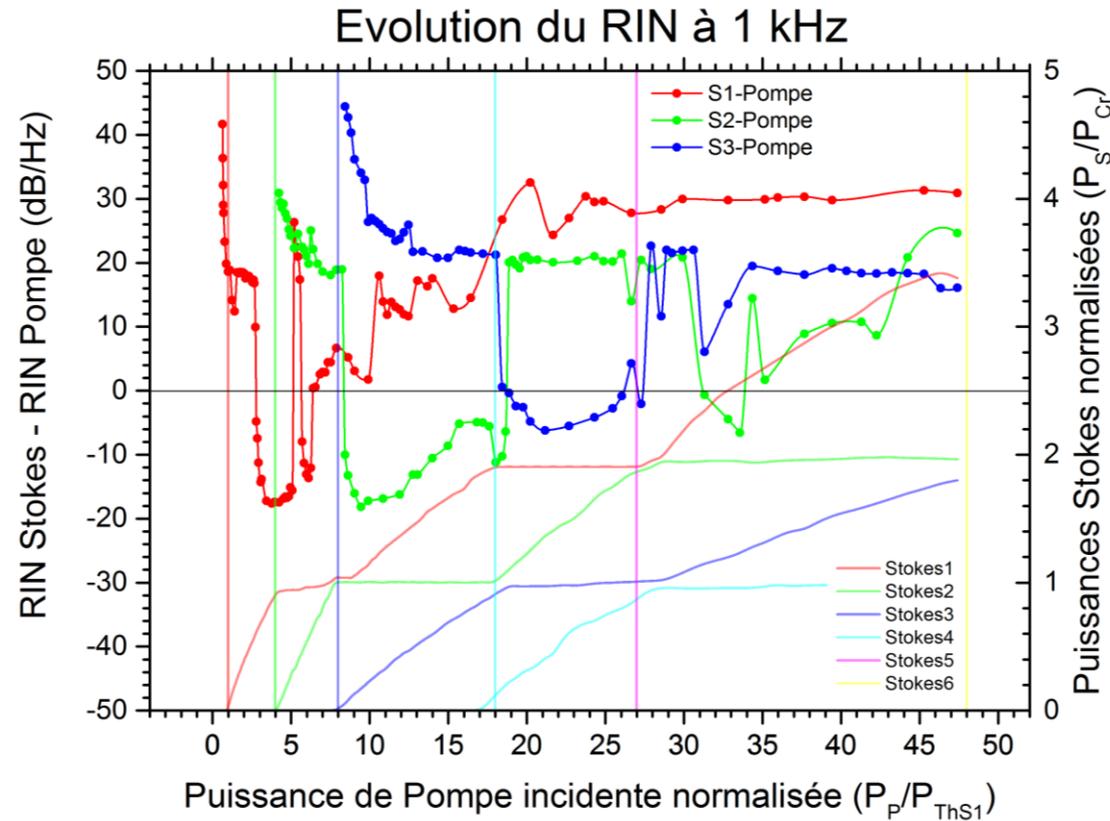
Pour N pairs :

$$P_{ThSN} = P_{ThS1} \frac{N}{2} \left(\frac{N}{2} + 1 \right)^2$$



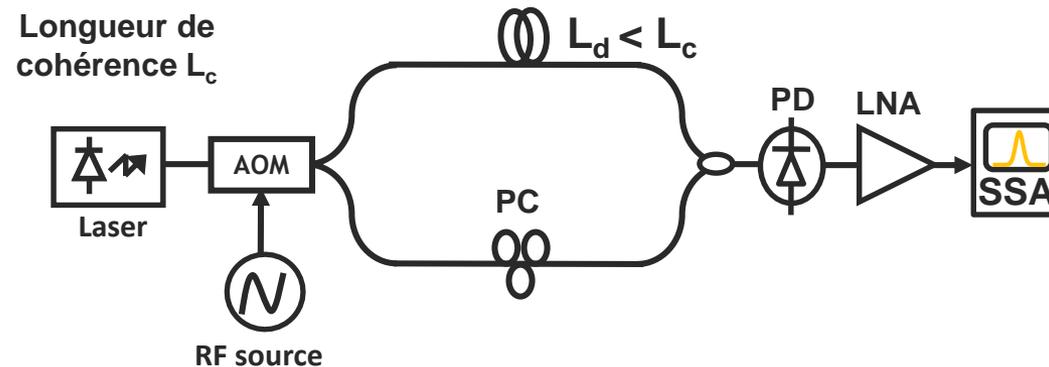
- Régime d'émission **spontanée** à **stimulée** → réduction de 25 dB du RIN
- Réduction drastique du bruit d'intensité du S1 au dessus du seuil du S2 (40 dB)

Bruits d'intensité des S1, S2, S3 @1kHz



- RIN du S1 supérieur au bruit de la pompe ($P_p < 4P_{ThS1}$) → Pb asservissement ?
- En régime saturé → forte réduction du RIN de l'émission Stokes
- Fonctionnement multi-stokes $N > 5$ → augmentation du RIN généralisée

Méthode auto-hétérodyne corrélée

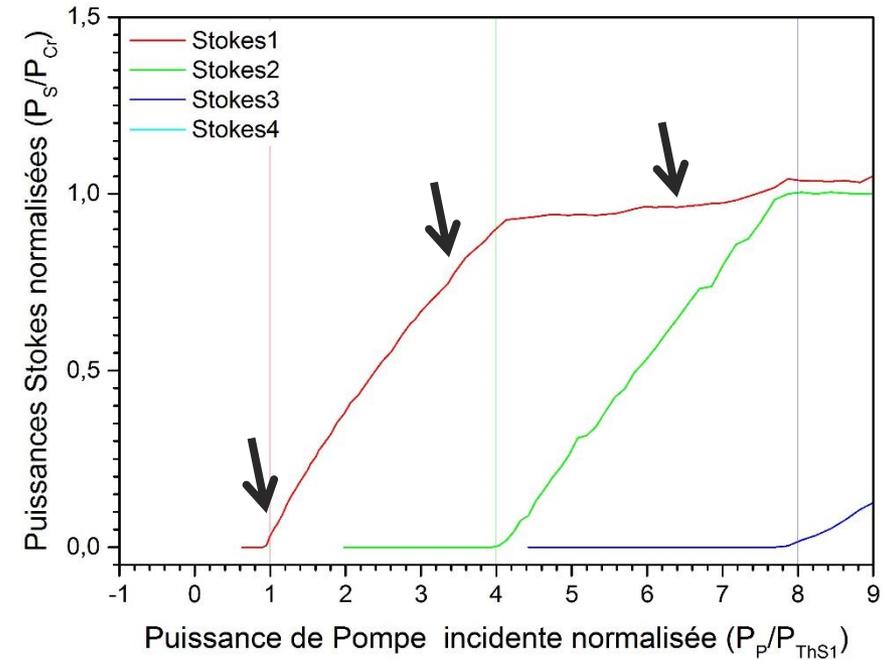
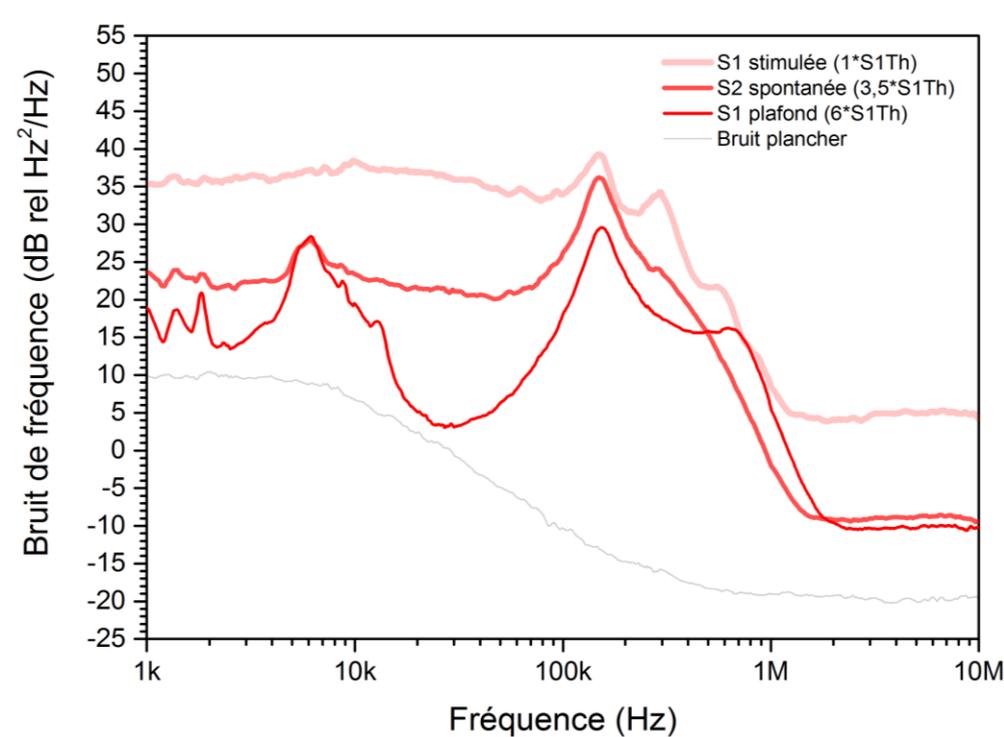


- Transfert du bruit de fréquence du domaine optique au domaine RF pour sa mesure
- Analyseur bruit de phase : détection des fluctuations de phase du laser $S_\phi(f)$

Après post traitement →
DSP du bruit de fréquence

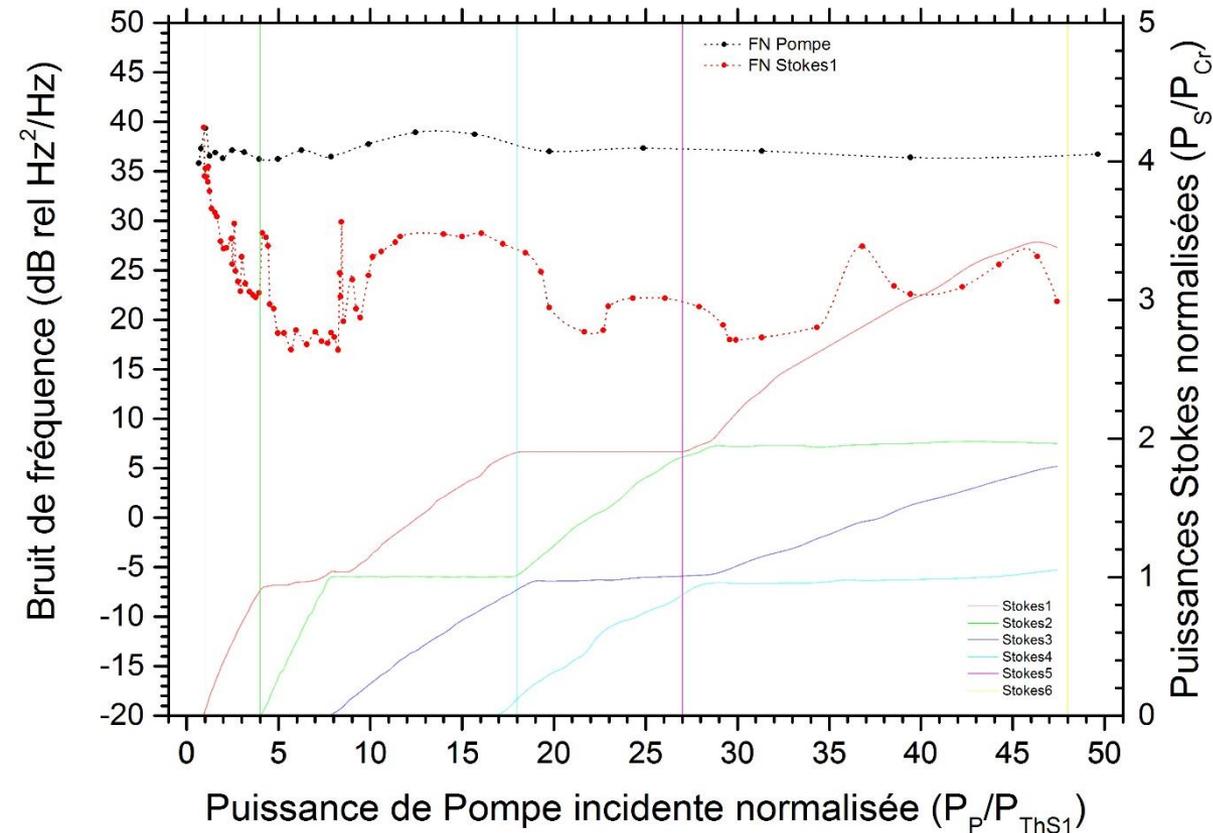
$$S_v(f) = \left(\frac{c}{2\pi n L_d} \right)^2 S_\phi(f)$$

Camatel and Ferrero JLT **26** 17 (2008)

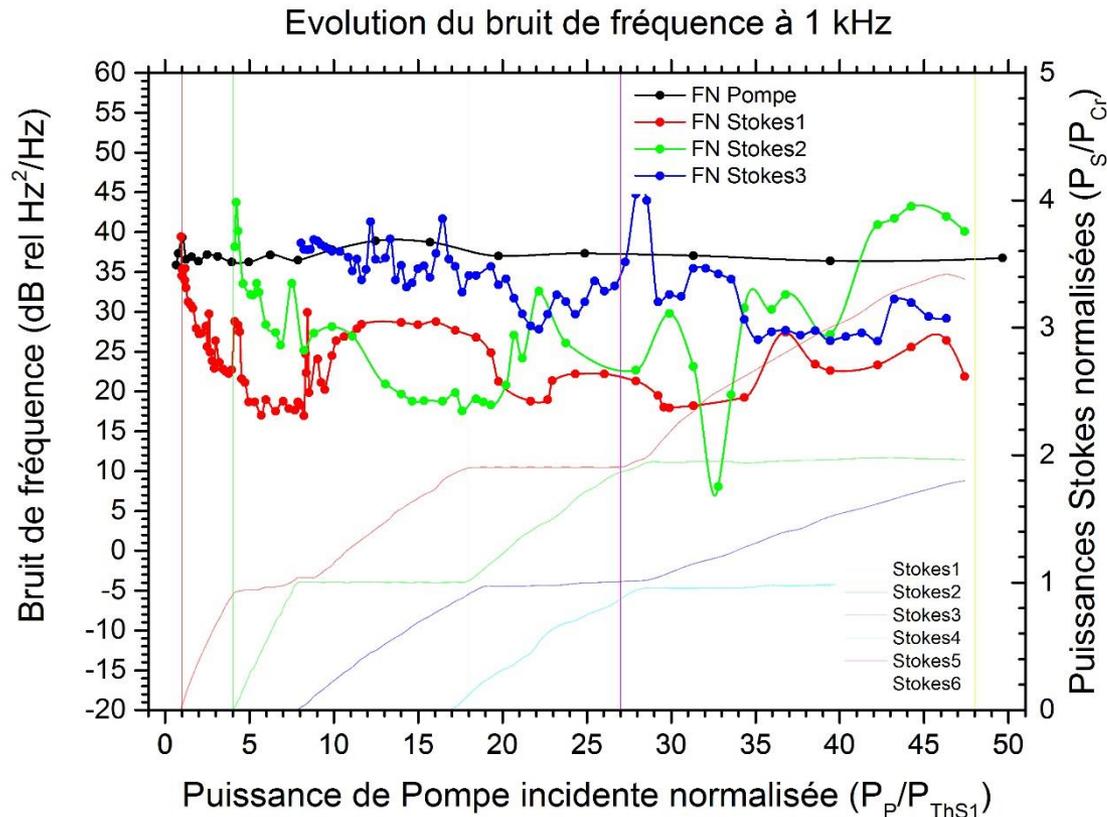


- Réduction de plus de 20 dB du bruit de fréquence à 1 kHz en régime saturé

Evolution du bruit de fréquence à 1 kHz



- Réduction du bruit de fréquence au dessus du seuil du S1 $\approx 20 \text{ dB}$
- Réduction de $20 \text{ dB} \rightarrow$ Valeur planchée ?



- Augmentation du bruit de fréquence par rapport à la pompe pour $N > 3$
- Instabilité dans la cavité \rightarrow FWM + thermique

Laser Brillouin à cavité résonante en fibre silice

Résultats

- Réduction de 20 dB du bruit d'intensité de la pompe @ 1kHz
- Réduction de 20 dB du bruit de fréquence de la pompe (affinement spectral) @ 1kHz

Analyse

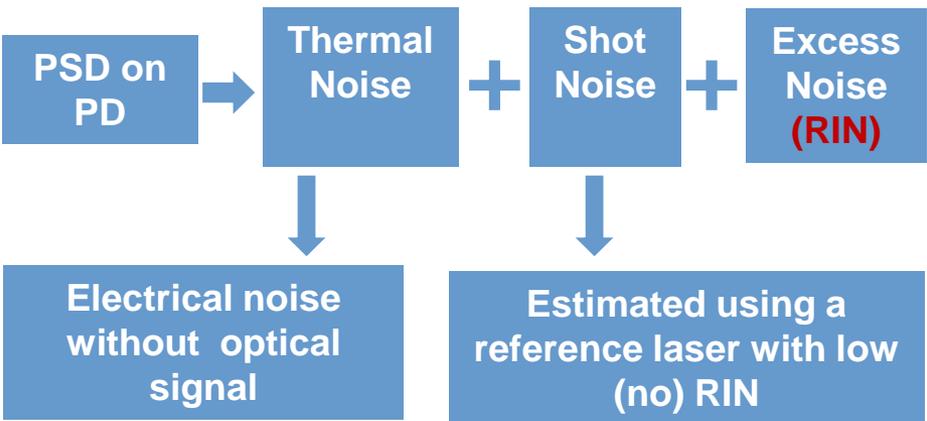
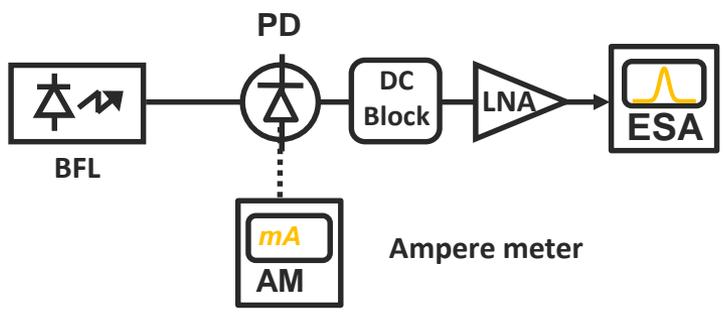
- Bénéfice de l'effet Brillouin sur les propriétés de bruits d'intensité et de fréquence pour une puissance de pompe $P_p \approx 4P_{ThS1}$
- Fonctionnement en régime fortement multi stokes -> fortes instabilités

Perspectives

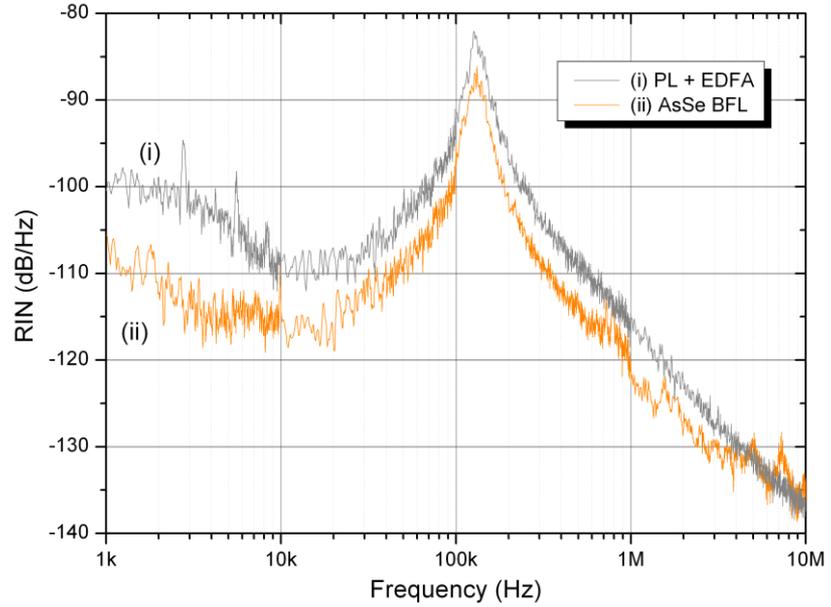
- Asservissement en température
- Amélioration de l'asservissement en fréquence de la cavité
- Utilisation de fibre chalcogénure : réduction des seuils laser
- Projet Solbo -> thèse juillet 2016

Intensity noise laser ↔ fluctuations of power output laser

RIN measurement based on a reference laser method

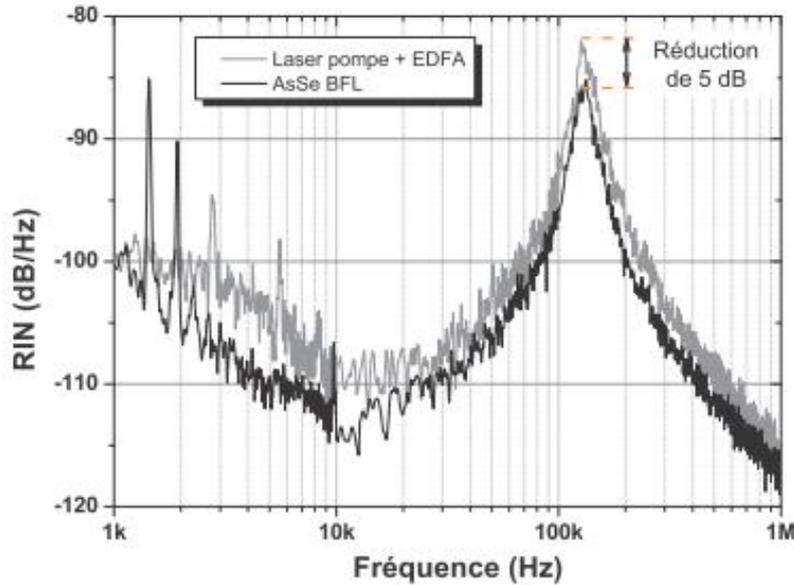


RIN of AsSe BFL

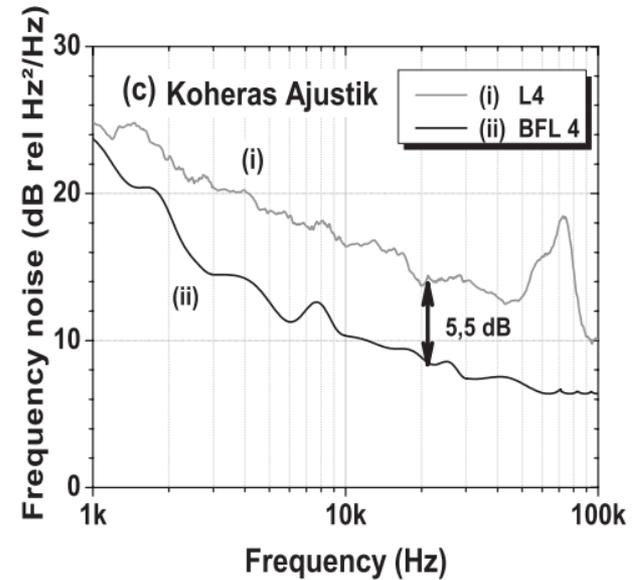


- Excess intensity noise for low frequencies due to EDFA
- BFL overall RIN reduction ~ 5 dB due to pump-stokes transfer filtering function (in agreement with theory 6 dB)



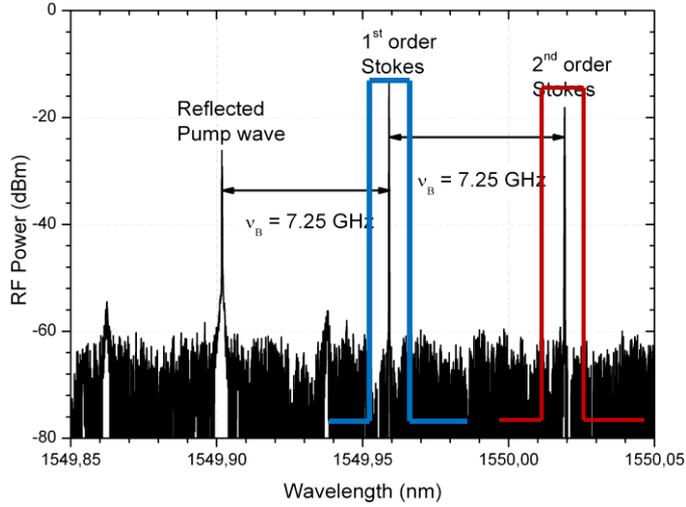
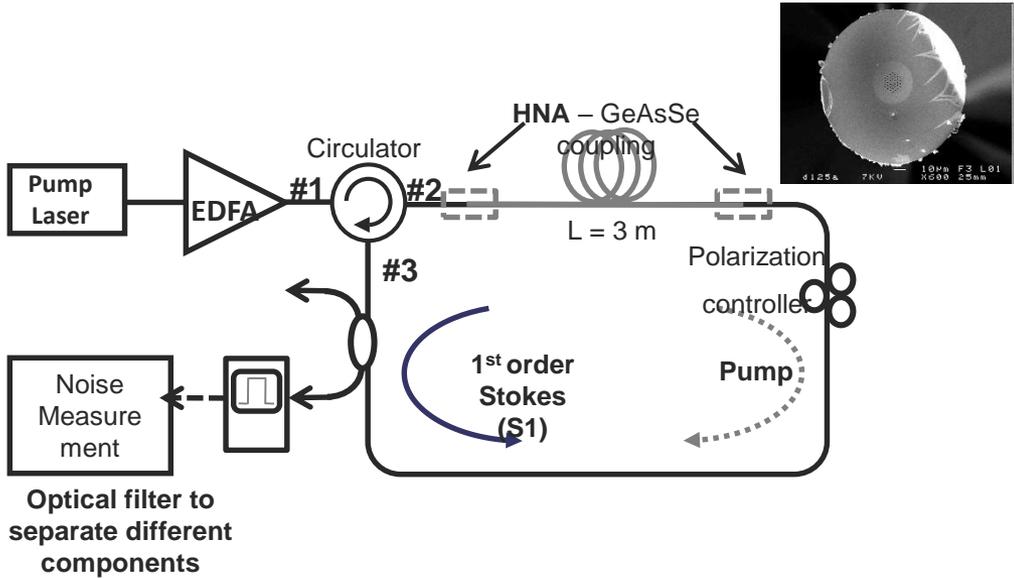


Réduction de 5 dB du bruit d'intensité de la pompe



Laser	Frequency Noise Reduction (dB)	$\Delta\nu_p$ (kHz)	$\Delta\nu_s$ (kHz)	$\Delta\nu_{th}$ (kHz)
Koheras Ajustik (L4)	5.5	4.1	1.81	0.51

Réduction de la largeur de raie



BFL chalcogénure non résonant

- Réduction de 5 dB du bruit d'intensité de la pompe
 - Réduction de 5,5 dB du bruit de fréquence de la pompe
 - Largeur de raie pompe : 4,1 kHz
 - Largeur de raie S1 : 1,8 kHz (limitation banc de mesure)
- K. Hey Tow *et al.* P.T.L. **25** (3) pp. 238-241 (2013)

