# GENERATION D'IMPULSIONS MONO-FREQUENCE DE 1 KW DANS DES AMPLIFICATEURS FIBRES A SECURITE OCULAIRE

# William Renard<sup>1</sup>, Erik Lucas<sup>1</sup>, Laurent Lombard<sup>1</sup>, Julien Le Gouët<sup>1</sup>, Didier Fleury<sup>1</sup>, Sylvain Bordais<sup>2</sup>, Guillaume Canat<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Onera – The French Aerospace Lab., 91123 Palaiseau Cedex, France <sup>2</sup>Keopsys, 2 rue Paul Sabatier, 22300 Lannion, France

\*guillaume.canat@onera.fr

# Résumé

Nous présentons dans cette communication nos derniers travaux sur l'augmentation du seuil de diffusion Brillouin stimulée (SBS) dans les fibres optiques. Nous avons développé une technique d'élargissement du spectre Brillouin par un gradient de contrainte. La technique mise en œuvre est appliquée à l'amplification de signaux mono-fréquence impulsionnels à 1545 nm (fibres co-dopées  $Er^{3+}/Yb^{3+}$ ) et 2050 nm (fibres dopées  $Tm^{3+}$ ) permettant d'atteindre respectivement 630 W et 1 kW de puissance crête. Le gain en puissance crête atteint 3,2 dB.

**MOTS-CLEFS :** *Diffusion Brillouin stimulée ; fibres co-dopées Erbium-Ytterbium ; fibres dopées Thulium, amplificateur fibré.* 

# **1. INTRODUCTION**

Les lasers à fibre à sécurité oculaire ont montré leur potentiel pour des applications de Lidar à détection cohérente [1]. Notamment, l'augmentation de la puissance des lasers à fibre permet de chercher de nouvelles applications pour les Lidars à détection cohérente, telle que la sécurité aéroportuaire [2]. Une telle source doit être mono-fréquence, d'une bonne qualité spatiale  $(M^2 < 1,3)$  et émettre des impulsions de durée 100 ns à 1 µs. Pour ces besoins, l'architecture laser est de type oscillateur maître amplifié (MOPFA pour Master Oscillator Power Fiber Amplifier) permettant de découpler la mise en forme de l'impulsion et les étages d'amplification. Pour l'application citée, une longue portée (> 10 km) et des temps d'acquisition courts (< 0,15 s) requièrent l'augmentation de l'énergie des impulsions laser. Cependant, l'énergie est limitée par l'apparition de la diffusion Brillouin Stimulée (SBS), à haute puissance crête. Le seuil de SBS pour une fibre donnée, amplificatrice ou passive, est défini par l'équation 1 :

$$\frac{g_B \max_{v} \int_{O}^{P} P(z) Lor(v - v_B(z)) dz}{A_{eff}} = \frac{g_B P_{out} L_{eff}}{A_{eff}} = 21$$
(1)

où g<sub>B</sub> est le gain Brillouin, L la longueur de la fibre, Lor( $\upsilon$ - $\upsilon_B(z)$ ) une fonction Lorentzienne centrée autour de  $\upsilon_B$  représentant le spectre Brillouin, P<sub>out</sub> la puissance crête en sortie de fibre et A<sub>eff</sub> l'aire effective du mode guidé dans le cœur. Pour pouvoir augmenter la puissance crête émise, il faut augmenter le seuil Brillouin. On peut ainsi réduire L ou L<sub>eff</sub>, augmenter A<sub>eff</sub> ou réduire g<sub>B</sub>. Pour un même gain, réduire L tout en augmentant la concentration en terres rares n'est pas toujours possible, à cause de leur limite de solubilité dans la silice. L'augmentation d'A<sub>eff</sub> en utilisant des fibres à large cœur (LMA : large-mode-area) est limitée lorsque la fibre devient multimode, car la qualité spatiale se détériore. Une autre solution consiste à diminuer L<sub>eff</sub> en créant des décalages en fréquence de la fréquence centrale  $\upsilon_B$  (z) du spectre Brillouin le long de la fibre. Il est possible de décaler spectralement le gain Brillouin en appliquant une variation du profil de vitesse acoustique le long de la fibre. Celui-ci peut être obtenu par des variations de température [3], de contrainte longitudinale [4] ou de composition. Nous montrerons qu'un profil optimal est donné par :

$$\left|\frac{dv_B(z)}{dz}\right| \propto P(z) \tag{2}$$

#### 2. DESCRIPTION DU DISPOSITIF

Notre technique, brevetée, consiste à appliquer un profil de contraintes mécaniques longitudinales le long de la fibre. Le dispositif permet d'appliquer un profil de contrainte proche du profil optimal (cf équation (2)).



Figure 1 – a. Exemple de profil de contrainte triangulaire appliqué. b. Comparaison du spectre Brillouin d'une fibre active avec ou sans le dispositif.

La Figure 1a montre un profil typique de contraintes appliquées le long d'une fibre optique. L'élongation maximale est de 0,5%. L'élargissement du spectre Brillouin (Figure 1b) permet d'augmenter le seuil Brillouin. Cette technique présente l'avantage remarquable d'utiliser des fibres optiques actives ou passives standard.

# 3. AMPLIFICATEUR TOTALEMENT FIBRE DE FORTE PUISSANCE CRETE A 1545 NM

La source laser développée est une architecture MOPFA à 1545 nm. Les impulsions d'une durée de 800 ns et cadencées à 10 kHz sont générées avec un modulateur acousto-optique (MAO) et sont amplifiées jusque 15  $\mu$ J. Le dernier étage d'amplification est construit à l'aide d'une fibre dopée  $\mathrm{Er}^{3+}/\mathrm{Yb}^{3+}$  LMA de 25  $\mu$ m de diamètre de cœur et 0,09 d'ouverture numérique. Le signal et la pompe (25 W à 975 nm) sont couplés à l'aide d'un combineur fibré [5]. La fibre est alors intégrée dans le dispositif d'augmentation du seuil du SBS.



Figure 2 – a. Evolution de la puissance moyenne et crête en sortie du dernier étage en fonction de la puissance de pompe. b. Trace temporelle des impulsions et profil du faisceau.

Sans le dispositif les puissances moyenne et crête sont respectivement limitées à 2,5 W et 300 W à cause de la SBS. L'ajout du dispositif permet d'atteindre une puissance crête de 630 W (limitée ici par la puissance de pompe disponible) pour des impulsions de 550 ns, ce qui représente un gain de 3,2 dB.

# 4. AMPLIFICATEUR TOTALEMENT FIBRE DE FORTE PUISSANCE CRETE A 2050 NM

La seconde source laser développée est une architecture MOPFA à 2050 nm. Les impulsions d'une durée de 100 à 400 ns cadencées à 20 kHz sont générées avec un MAO et sont amplifiées jusque 10  $\mu$ J. Les impulsions sont amplifiées dans une fibre dopée Tm<sup>3+</sup> de 25  $\mu$ m de diamètre de cœur et 0,09 d'ouverture numérique. La puissance de pompe disponible à 793 nm est de 30 W [6]. La fibre est alors intégrée dans le dispositif d'augmentation du seuil Brillouin.



Figure 3 – Evolution de la puissance crête en sortie du dernier étage d'amplificateur en fonction de la puissance de pompe pour différentes durées d'impulsions.

Sans le dispositif la puissance crête est respectivement limitée 535 W à cause du SBS dans la fibre dopée. L'ajout du dispositif permet d'atteindre 1000 W de puissance crête. La puissance est alors limitée par le SBS dans le pigtail de sortie. Le dispositif a permis de gagner +2,7 dB de puissance crête en sortie tout en étant limité par le SBS dans le pigtail de sortie.

# CONCLUSION

Nous avons développé un nouveau dispositif permettant d'augmenter le seuil Brillouin des fibres optiques pour la propagation et l'amplification de signaux mono-fréquence. Notre technique, basée sur des contraintes mécaniques permet d'utiliser des fibres optiques commerciales. Le dispositif a été appliqué au développement de deux amplificateurs fibrés et a permis d'augmenter le seuil du SBS jusqu'à 3,2 dB permettant d'atteindre jusqu'à 630 W et 1 kW de puissance crête à 1545 nm et 2050 nm respectivement.

#### REFERENCES

- [1] J.-P. Cariou, et al., "Laser source requirements for coherent lidars based on fiber technology", C.R. Physique 7 (2006).
- [2] A. Dolfi-Bouteyre, et al., "Pulsed 1.5 μm LIDAR for Axial Aircraft Wake Vortex Detection Based on High-Brightness Large-Core Fiber Amplifier," Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of , vol.15, no.2, pp.441,450, March-april 2009.
- [3] L. Gruner-Nielsen, D. Jakobsen, S. Herstrom, B. Palsdottir, S. Dasgupta, D. Richardson, and P. Andrekson, Brillouin suppressed in highly nonlinear fibers, In Optical Communications (ECOC), 38th European Conference and Exhibition on IEEE (2012) 1-3
- [4] J. Boggio, et al., Experimental and Numerical Investigation of the SBS-Threshold Increase in an Optical Fiber by Applying Strain Distributions, J. Lightwave Technol. 23, (11) (2005) 3808-3814.
- [5] G. Canat, et al., Eyesafe High Peak Power Pulsed Fiber Lasers limited by fiber nonlinearity, Journal of Optical Fiber Technology, Special issue on short pulses, accepté pour publication.
- [6] E. Lucas, et al., "1 kW peak power, 110 ns single-frequency thulium doped fiber amplifier at 2050 nm," Appl. Opt. 53, 4413-4419 (2014).