

# LASER A FIBRE A VERROUILLAGE DE MODES DE HAUTE ENERGIE A 1560 NM

M. Tang<sup>1</sup>, H. Wang<sup>1</sup>, R. Becheker<sup>2</sup>, J-L. Oudar<sup>3</sup>, D. Gaponov<sup>4</sup>, A. Hideur<sup>1</sup>

<sup>1</sup> CORIA-UMR6614- Normandie Université, CNRS-Université et INSA de Rouen, Campus Universitaire du Madrillet, 76800 Saint Etienne du Rouvray, France.

<sup>2</sup> Laboratoire d'Electronique Quantique, USTHB, BP 32 El Alia, 16111 Bab Ezzouar, Algérie

<sup>3</sup> LPN-CNRS, Route de Nozay, 91460, Marcoussis, France

<sup>4</sup> Novae, Zone artisanale de Bel Air, 87700 Saint Martin le Vieux, Limoges, France

[hideur@coria.fr](mailto:hideur@coria.fr)

## RÉSUMÉ

Nous rapportons la génération d'impulsions ultracourtes de forte énergie à partir d'un oscillateur à fibre dopée erbium opérant en régime de forte dispersion normale. Le régime de verrouillage de modes est initié et stabilisé par les effets combinés d'un absorbant saturable et d'un filtre spectral. Le laser est auto-démarrant et génère des impulsions de 8.7 ps avec des énergies de plus de 22 nJ. Ces impulsions fortement étirées sont comprimées, à l'extérieur de la cavité, à leur limite théorique de 620 fs.

**MOTS-CLEFS :** *lasers à fibres optiques ; impulsions ultracourtes, verrouillage de modes*

## 1. INTRODUCTION

Les applications mettant en jeux des rayonnements lumineux ultrarapides font de plus en plus appel à la technologie des lasers à fibre en raison de ses nombreux avantages tels que la forte compacité, la stabilité, la forte puissance, et la facilité d'utilisation. Stimulées par plusieurs applications industrielles et scientifiques, les performances des systèmes laser à fibre à impulsions ultracourtes ont subi une croissance phénoménale au cours de la dernière décennie. Cette croissance vertigineuse a concerné essentiellement les lasers à fibres dopées ytterbium opérant à 1µm. L'extension de ces développements à la région spectrale de sécurité oculaire centrée autour de 1.5 µm pourrait trouver de nouveaux débouchés dans l'industrie, la métrologie et la médecine.

Les avantages de la technologie des fibres tels que le confinement du mode et les grandes longueurs de gain constituent des problèmes fondamentaux pour la génération d'impulsions ultracourtes de hautes énergies. Ces limitations proviennent des fortes non-linéarités induites dans la silice par la propagation d'impulsions de fortes puissances crêtes. Néanmoins, ces dernières années, plusieurs développements fondamentaux et technologiques montrent que ces limitations peuvent être contournées. En particulier, l'exploitation de nouveaux régimes de propagation non-linéaire dans des fibres à dispersion normale permet de repousser les seuils des effets non-linéaires à de fortes puissances crêtes. C'est le cas des lasers à impulsions auto-similaires qui génèrent des impulsions à profils temporels paraboliques qui résistent mieux aux non-linéarités [1]. La première génération de ces lasers comprend une ligne à compensation de dispersion intra-cavité qui permet d'assurer la condition de résonance sur un tour de cavité [1]. Les performances de ces sources ont été nettement améliorées en exploitant des cavités à dispersion totalement normale [2]. L'établissement du régime de verrouillage de modes dans une cavité à dispersion normale nécessite l'introduction d'un filtre spectral en plus du mécanisme de modulation d'amplitude qui agit dans le domaine temporel [3,4]. La mise en œuvre de ce concept avec des fibres dopées erbium a déjà permis d'atteindre des énergies de 20 nJ avec des impulsions de 750 fs [5]. Cependant, les impulsions générées souffrent d'un large piédestal qui s'étale sur une dizaine de picosecondes et qui contient plus de 50% de l'énergie totale.

Dans cette communication, nous rapportons une nouvelle configuration d'un laser à fibre à verrouillage de modes à dispersion fortement normale opérant à 1560 nm. Le laser est auto-

démarrant à partir du bruit et génère des impulsions fortement étirées de 8.7 ps avec des énergies de plus de 22 nJ.

## 2. EXPERIENCES ET RESULTATS

Le montage expérimental du laser est montré sur la figure 1. La cavité est montée en configuration Fabry-Pérot et comprend une fibre fortement dopée erbium de 1.2 m de longueur. La dispersion de la fibre active est de  $\beta_2 = +61 \text{ ps}^2/\text{km}$ . Une diode laser monomode émettant à 976 nm assure le pompage optique de la fibre amplificatrice à travers un multiplexeur. Un segment de fibre à compensation de dispersion (DCF) de 10 mètres de longueur a été ajouté pour contrôler la dispersion totale de la cavité. La dispersion de la DCF utilisée a été mesurée à  $+116 \text{ ps}^2/\text{km}$ . Du côté de la DCF, la cavité est refermée par un réseau de diffraction de 600 traits/mm qui, combiné avec une lentille de 8 mm de focale, constitue un filtre spectral d'environ 3.5 nm de largeur à mi-hauteur.

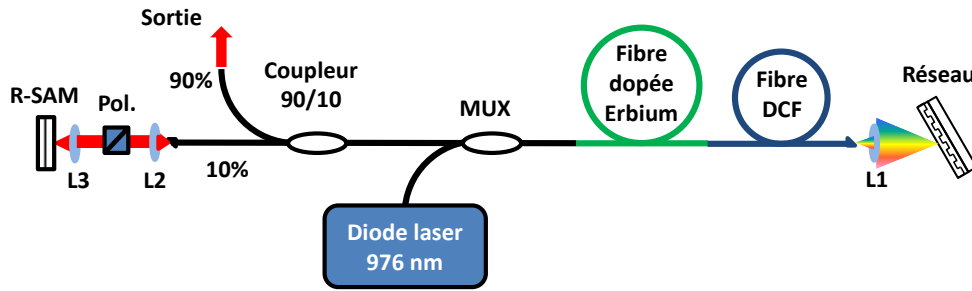


Fig. 1: Schéma du montage expérimental du laser à fibre dopée erbium. MUX : multiplexeur ; L1, L2, L3 : lentilles de couplage ; R-SAM : absorbant saturable à semi-conducteur ; Pol. : Polariseur.

L'autre extrémité de la cavité comprend un coupleur 90/10 minimisé en longueur constitué de fibre standard ( $\beta_2 = -22 \text{ ps}^2/\text{km}$ ), un polariseur, les lentilles de couplage et un absorbant saturable résonant (R-SAM) qui sert à démarrer le régime de verrouillage de modes. L'absorbant saturable présente une profondeur de modulation de 38%, une fluence de saturation de  $3.8 \mu\text{J}/\text{cm}^2$  et un temps de relaxation de 2.3 ps. La longueur totale de la cavité incluant la partie en espace libre est de 12.5m environ, ce qui correspond à un intervalle spectral libre de 8 MHz. La dispersion totale de la cavité est estimée à  $+1.22 \text{ ps}^2$ .

En optimisant l'alignement des différents éléments de la cavité et en ajustant convenablement l'orientation de l'axe du polariseur, un régime de verrouillage de modes est initié pour un courant de pompage de 1100 mA (puissance de pompe 750 mW). Ce régime demeure stable jusqu'au maximum de puissance pompe disponible de 850 mW.

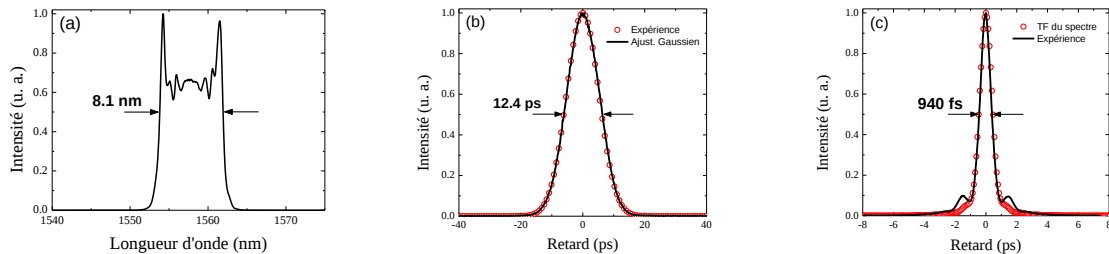


Fig. 2 : Caractéristiques de la source pour une énergie de sortie de 22 nJ : Spectre optique (a) et traces d'autocorrélations mesurées avant (b) et après compression (c).

Le laser délivre alors une puissance de 180 mW, ce qui correspond à une énergie par impulsion de plus de 22 nJ. Les caractéristiques spectrales et temporelles des impulsions générées sont présentées sur la figure 2. Le spectre optique présente une forme en « M » avec deux pics intenses sur les bords [Fig. 2(a)]. Cette allure est typique des lasers opérant en régime de forte dispersion normale. La

largeur spectrale à mi-hauteur est de 8.1 nm. La trace d'autocorrélation présente un profil quasi-Gaussien avec une largeur à mi-hauteur de 12.4 ps, ce qui correspond à une durée d'impulsion de 8.7 ps [Fig. 2(a)]. Les impulsions sont comprimées à l'extérieur de la cavité en utilisant une paire de réseaux en transmission de 1000 traits/mm et 92% de rendement de diffraction. Les impulsions sont ainsi comprimées à moins de 620 fs de durée qui est égale à la limite théorique obtenue par transformation de Fourier du spectre optique [Fig. 2 (c)]. Notons que la trace d'autocorrélation des impulsions comprimées présente un léger piédestal qui contient moins 10% de l'énergie totale.

### 3. CONCLUSION

Nous avons démontré la réalisation d'un laser à fibre dopée  $\text{Er}^{3+}$  opérant en régime de verrouillage de modes et émettant à 1560 nm. Le laser génère un train d'impulsions stables de 180 mW de puissance moyenne à la cadence de 8 MHz, ce qui correspond à une énergie par impulsion de plus de 22 nJ. Ceci représente une avancée significative en termes d'énergie extraite directement d'un oscillateur à fibre autour de cette longueur d'onde. Les détails sur l'évolution des régimes de fonctionnement de la source en fonction des paramètres de filtrage et de dispersion de la cavité et les perspectives pour l'amélioration de ses performances seront discutés lors de la conférence.

### REMERCIEMENTS

Ce travail a bénéficié de l'aide de l'Agence Nationale de la Recherche au titre des projets EMC3 (ANR-10-LABX-09-01) et UBRIS2 (ANR-13-BS09-0018).

### REFERENCES

- [1] F. Ö. Ilday, J.R. Buckley, W.G. Clark, and F.W. Wise, "Self-Similar Evolution of Parabolic Pulses in a Laser," *Phys. Rev. Lett.* **92**, 213902 (2004)
- [2] A. Chong, W. H. Renninger, and F. W. Wise, "All-normal-dispersion femtosecond fiber laser with pulse energy above 20nJ," *Opt. Lett.* **32**, 2408-2410 (2007).
- [3] B. Nie, D. Pestov, F. W. Wise, and M. Dantus, "Generation of 42-fs and 10-nJ pulses from a fiber laser with self-similar evolution in the gain segment," *Opt. Express* **19**, 12074-12080 (2011).
- [4] H. Liu, Z. Liu, E. S. Lamb, and F. Wise, "Self-similar erbium-doped fiber laser with large normal dispersion," *Opt. Lett.* **39**, 1019-1021 (2014).
- [5] N. B. Chichkov, K. Hausmann, D. Wandt, U. Morgner, J. Neumann, and D. Kracht, "High-power dissipative solitons from an all-normal dispersion erbium fiber oscillator," *Opt. Lett.* **35**, 2807 (2010).