

SOURCE LASER AUTO-PULSANTE VIA AUTO-DÉCALAGE FRÉQUENTIEL DE SOLITONS ET AUTO-MODULATION DE PHASE

Thibault North et Martin Rochette

Département de génie électrique et informatique, Université McGill, 845 Sherbrooke Street West,
Montréal, Québec, Canada H3A 2A7

martin.rochette@mcgill.ca

RÉSUMÉ

Nous présentons un laser à fibre pulsé dont le design comprend la succession d'un étage d'auto-décalage fréquentiel de solitons suivi d'un étage d'auto-modulation de phase. Ce laser émet un signal à une cadence de 95 kHz et selon le point d'observation du signal dans la cavité résonante, il prend la forme d'un spectre étroit ou d'un supercontinuum d'une largeur de bande de 150 nm.

MOTS-CLEFS : *laser pulsé ; régénération optique ; auto-décalage en fréquence.*

1. INTRODUCTION

Les lasers à fibres à oscillation auto-pulsante ont été considérablement étudiés ces dernières décennies pour leurs applications industrielles en instrumentation et pour les communications par fibre optique. Récemment, nous avons présenté une source auto-pulsante exploitant une nouvelle méthode de verrouillage de modes basée sur une paire de régénérateurs optiques en boucle fermée, émettant simultanément à $[\geq 2]$ longueurs d'onde, et ajustable en longueur d'onde autour de 1550 nm [1, 2]. Suivant le même principe, mais avec une architecture de cavité différente, il a été démontré de façon théorique que cette technique de verrouillage de mode fonctionne également à une longueur d'onde de 1060 nm [3]. Par compensation externe de la dispersion chromatique, il a été montré que ces sources pouvaient produire des impulsions de durée inférieure à la picoseconde. Contrairement aux sources pulsées avec verrouillage de phase passif basé sur la rotation non-linéaire de polarisation ou autre absorbant saturable [4], une source régénérative induit et maintient la présence d'impulsions qui sont des solutions stables de la cavité, nommées impulsions propres ou *eigenpulses*. Ces impulsions propres sont altérées et reformées après chaque cycle de propagation dans la cavité.

Dans cette communication, nous présentons les résultats expérimentaux et théoriques issus d'une source conjuguant successivement un étage d'auto-décalage fréquentiel de soliton (ADFS) dû à l'effet Raman intrapulse et d'un étage d'auto-modulation de phase (AMP) [5, 6]. Le montage expérimental présenté est aisément réalisable, est peu sensible à la polarisation et engendre un supercontinuum sans l'aide d'une source pulsée externe.

2. MONTAGE EXPÉRIMENTAL ET RÉSULTATS

La figure 1 (a) présente le montage expérimental du laser. Il s'agit d'un montage en boucle composé de deux moitiés ayant chacune une fonction non-linéaire distincte. Dans la première moitié de la cavité, la première fibre hautement non-linéaire (FHNL₁) de coefficient non-linéaire guide d'onde $\gamma = 11.5 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ et de coefficient de dispersion chromatique $D_1 = -0.71 \text{ ps nm}^{-1} \text{ km}^{-1}$ induit un étalement spectral par AMP sur les impulsions la parcourant. Pour compléter le procédé de régénération avec un filtrage spectralement décalé, un réseau de Bragg est utilisé de paire avec un circulateur optique afin d'effectuer un filtrage centré en $\lambda_1 = 1545.5 \text{ nm}$ avec une bande passante (BP) de 5 nm. La première moitié de la cavité se termine avec une fibre mono-mode standard de 42 m de longueur, compensant la dispersion chromatique de la FHNL₁. Dans la seconde moitié de la cavité, le mécanisme de sélection d'impulsions est l'ADFS suivi d'un filtrage spectral. La fibre FHNL₂ a un coefficient non-linéaire guide d'onde $\gamma = 11.5 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ et une dispersion chromatique anormale $D_2 = 2.09 \text{ ps nm}^{-1} \text{ km}^{-1}$. Cette fibre

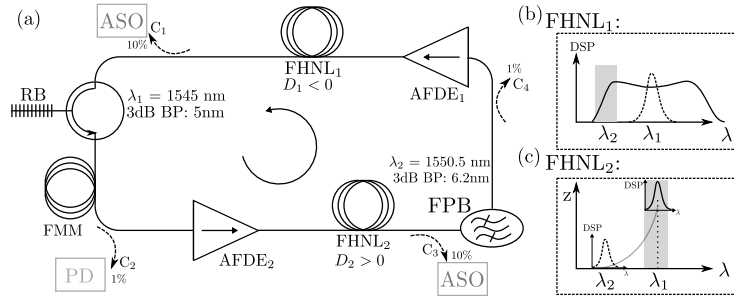


FIGURE 1 : (a) Montage expérimental du laser à fibre auto-pulsé. En (b) et (c), représentation schématique des spectres d'impulsions avant (pointillé) et après (trait plein) propagation dans chaque fibre hautement non-linéaire. FHNL : Fibre hautement non-linéaire, AFDE : amplificateur à fibre dopé à l'erbium, RB : réseau de Bragg, FPB : filtre passe-bande, FMM : fibre mono-mode, PD : photo-diode, ASO : analyseur de spectre optique, DSP : densité spectrale de puissance, BP : bande passante.

non-linéaire est suivie d'un filtre syntonisable d'une BP de 6.2 nm centré en $\lambda_2 = 1550.5$ nm afin de sélectionner les impulsions qui ont subi un décalage fréquentiel spécifique. La cavité est équipée de coupleurs C_{1-4} pour l'observation des impulsions. Les figures 1 (b) et (c) illustrent, en fréquence, le résultat de la propagation d'impulsions dans chaque moitié de la cavité. Les pertes d'insertion sont de 1.7 dB pour la FHNL₁, 3.3 dB pour le couple circulateur et réseau de Bragg, 1.2 dB pour la FHNL₂ et 9.9 dB pour le filtre passe-bande ajustable. Chaque coupleur a une perte d'insertion de ~ 0.5 dB. Les impulsions parcourant la cavité sont observées spectralement à l'aide d'analyseurs de spectres connectés aux coupleurs 10% $C_{1,3}$, et également dans le domaine temporel via une photodiode suivie d'un oscilloscope à la sortie 1% C_2 .

La source démarre à partir d'émission spontanée amplifiée par les deux amplificateurs à fibres dopées à l'erbium (AFDE). Le gain initial est de 11.6 dB pour l'AFDE₁ et 16.2 dB pour l'AFDE₂. La figure 2 (a) illustre les spectres observés aux sorties C_1 , C_2 et C_3 , alors que (b) et (c) montrent la trace de l'oscilloscope issue de la photodiode en C_2 . La trace visible en (c) illustre le fait que le laser produit des impulsions tous les 10.5 μ s, et (d) suggère que ces impulsions sont formées d'une cascade d'impulsions plus courtes. Ceci soutient l'hypothèse d'une co-propagation de solitons d'ordre un de différentes puissances crête et de différentes vitesses de groupe. Le supercontinuum observé à la sortie C_3 est issu de la propagation d'impulsions ayant subi un ADFS dans la FHNL₂, condition requise pour un régime pulsé. Il semble également à la sortie C_1 que les impulsions présentes dans la cavité à une longueur d'onde proche de la pompe causent un gain Raman responsable d'émission spontanée amplifiée autour de la longueur d'onde 1662 nm. La circulation d'impulsions dans la cavité a été simulée. Une méthode *split-step* Fourier a été utilisée pour la propagation dans les fibres, considérant l'effet Kerr ainsi que la dispersion d'ordre deux et trois, l'auto-raïdissement (*self-steepening*) et l'effet Raman. La modélisation tient compte des filtres passe-bande et du gain saturable des amplificateurs. Les figures 3 (a) et (c) illustrent la présence de solitons en fin de la FHNL₂ pour les 10 et 50ème tours de cavité, respectivement. Le large spectre de la figure 3 (c) résulte de la propagation d'impulsions courtes dans la FHNL₂, dont l'auto-décalage en fréquence est fonction de la puissance crête et de la largeur d'impulsion. Puisque le taux d'auto-décalage en fréquence est proportionnel à $1/t_{\text{fwhm}}^4$ [5], il s'ensuit que seuls les solitons d'une durée spécifique seront maintenus dans la cavité. Un autre mécanisme de sélection des impulsions est effectué par l'étage d'élargissement spectral par AMP suivi du filtrage spectralement décalé. L'amplitude du décalage spectral entre le filtre et le signal avant AMP sélectionne les impulsions qui passent dans le filtre passe-bande à partir de leur profil temporel. Également, la BP du filtre passe-bande détermine la limite inférieure de durée de l'impulsion.

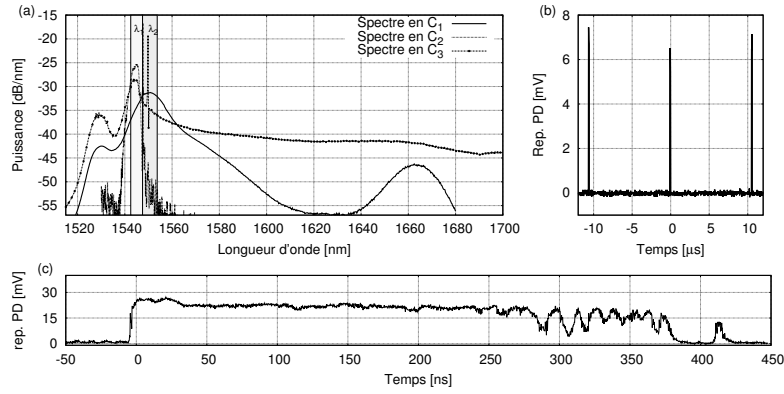


FIGURE 2 : En (a) Spectres issus des sorties C_1 , C_2 et C_3 . En (b) Trace de l'oscilloscope présentant le taux de répétition de la cavité et la structure des impulsions du signal de sortie. En (c), agrandissement d'une des impulsions pour montrer sa structure formée d'une succession d'impulsions plus courtes.

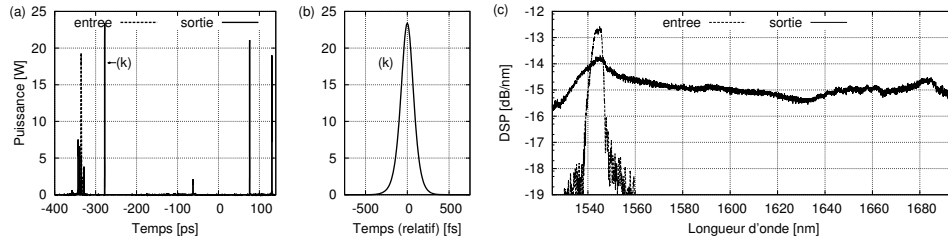


FIGURE 3 : En (a), solitons d'ordre un après la FNL $_2$. En (b), zoom sur l'un de ces solitons, identifié par un k . En (c), spectre obtenu par une moyenne sur 50 passages successifs dans la FHL $_2$, à partir du 10 $^{\text{ème}}$ tour. Les pointillés et traits pleins correspondent aux entrées et sorties de la FHL $_2$, respectivement.

CONCLUSION

Nous avons montré qu'une oscillation laser auto-pulsante peut être effectuée grâce à la succession d'un étage d'ADFS et d'un étage d'AMP. La cavité émet des impulsions à partir d'émission spontanée amplifiée et engendre une série d'impulsions courtes formant un supercontinuum plat d'une largeur spectrale de 150 nm.

Les auteurs remercient Pierre Galarneau pour ses commentaires pertinents ainsi que l'Institut National d'Optique (INO) de Québec pour son soutien financier.

RÉFÉRENCES

- [1] M. Rochette, L. R. Chen, K. Sun, and J. Hernandez-Cordero, "Multiwavelength and Tunable Self-Pulsating Fiber Cavity Based on Regenerative SPM Spectral Broadening and Filtering," *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 20, no. 17, pp. 1497–1499, sept.1, 2008.
- [2] K. Sun, M. Rochette, and L. R. Chen, "Output characterization of a self-pulsating and aperiodic optical fiber source based on cascaded regeneration," *Opt. Express*, vol. 17, no. 12, pp. 10 419–10 432, Jun 2009. [Online]. Available : <http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=oe-17-12-10419>
- [3] S. Pitois, C. Finot, L. Provost, and D. Richardson, "Generation of localized pulses from incoherent wave in optical fiber lines made of concatenated Mamyshev regenerators," *JOSA B*, vol. 25, no. 9, pp. 1537–1547, 2008.
- [4] L. Nelson, D. Jones, K. Tamura, H. Haus, and E. Ippen, "Ultrashort-pulse fiber ring lasers," *Applied Physics B : Lasers and Optics*, vol. 65, no. 2, pp. 277–294, 1997.
- [5] J. Gordon, "Theory of the soliton self-frequency shift," *Optics letters*, vol. 11, no. 10, pp. 662–664, 1986.
- [6] P. Mamyshev, "All-optical data regeneration based on self-phase modulation effect," in *Optical Communication, 1998. 24th European Conference on*, vol. 1. IEEE, 1998, pp. 475–476.