

OPÉRATION DES SOURCES RÉGÉNÉRATIVES BASÉES SUR L'AUTO-MODULATION DE PHASE ET L'AUTO-DÉCALAGE FRÉQUENTIEL DE SOLITONS

Thibault North, Alaa Al-kadry et Martin Rochette

Département de génie électrique et informatique, Université McGill, 845 rue Sherbrooke Ouest, Montréal,
Québec, Canada H3A 0E9

thibault.north@mail.mcgill.ca

RÉSUMÉ

Le mécanisme de fonctionnement et le domaine d'opération d'une source régénérative incluant un convertisseur non-linéaire de longueur d'onde (CNL) basé sur l'effet Raman intra-impulsion est décrit et illustré de manière expérimentale et numérique.

MOTS-CLEFS : *laser pulsé; laser à fibre; auto-décalage fréquentiel de solitons; instabilité de modulation; auto-modulation de phase.*

1. INTRODUCTION

La génération d'impulsions ultra-courtes dans les lasers à fibres reste un vaste sujet de recherche après presque trois décennies[1], pour leur large champ d'application incluant imagerie, spectroscopie et usinage. Un élément essentiel de ces lasers est leur absorbant saturable, qui définit une fonction de transfert non-linéaire en puissance, afin que les hautes intensités optiques soient transmises avec une atténuation minimale, alors que les faibles intensités sont rejetées. Pour ce faire, les techniques les plus répandues se basent sur la séparation et recombinaison d'impulsions ayant parcouru un chemin différent. C'est le cas des miroirs non-linéaires[2], ainsi que de la rotation de polarisation[3]. Des semi-conducteurs tels que les nanotubes de carbone, ainsi que le graphène ont également été récemment utilisés comme absorbant saturables[4]. Finalement, il est possible de générer des impulsions courtes par régénération cascadée[5, 6]. Dans ces cavités, la longueur d'onde centrale des impulsions est modifiée par l'action d'effets non-linéaires au moins deux fois par tour de cavité. Chacun de ces CNLs, suivi d'un filtrage décalé, joue ainsi le rôle de fonction de transfert non-linéaire empêchant une oscillation laser continue.

Dans ce travail, nous discutons l'opération d'une source régénérative qui inclut un CNL basé sur l'auto-décalage fréquentiel de solitons lors de la génération d'un supercontinuum (SC)[7]. Des résultats expérimentaux indiquent qu'une source de ce type génère des impulsions pour de nombreuses configurations des filtres passe-bande (FPBs) inclus dans la cavité. Ces résultats illustrent également un comportement stochastique du laser, dont la puissance moyenne varie à chaque tour de cavité [8]. Ces variations produisent en moyenne des impulsions qui s'étendent sur une large bande, couvrant une plage comprise entre 1500 et 1900 nm.

2. CONFIGURATION EXPÉRIMENTALE ET OPÉRATION DE LA SOURCE AUTO-PULSANTE

Le montage expérimental de ce laser est illustré à la figure 1. Chaque CNL est formé d'une fibre hautement non-linéaire (FHNL) ainsi que d'un FPB ajustable en longueur d'onde et en bande passante. Le premier CNL est un régénérateur basé sur l'auto-modulation de phase [9], à l'aide d'une FHNL en dispersion normale $D_1 = -0.71 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ à 1550 nm suivi d'un filtrage décalé vers le bleu, via FPB₂. Le second CNL comporte une FHNL en dispersion anormale $D_2 = 2.09 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ à 1550 nm, suivi d'un FPB (FPB₁) décalé vers le rouge. Ces deux convertisseurs sont joints en boucle fermée avec l'ajout d'amplificateurs dopés erbium, compensant les pertes dues au filtrage. Le coefficient de non-linéarité guide d'onde des FHNLs est de $11.5 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$, et leur longueur est de 1 km.

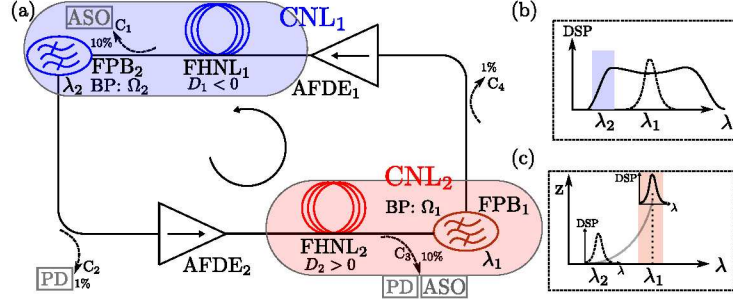


FIGURE 1 : (a) Montage expérimental de la source. (b) Représentation de l'effet du premier CNL basée sur l'auto-modulation de phase. (c) Représentation de l'effet du second CNL, dans lequel l'effet Raman décale les impulsions vers le rouge. AFDE : amplificateur à fibre dopé à l'erbium, FHNL : Fibre hautement non-linéaire, FPB : filtre passe-bande, ASO : analyseur de spectre optique, BP : bande passante, CNL : convertisseur non-linéaire de longueur d'onde, DSP : densité spectrale de puissance, PD : photo-diode.

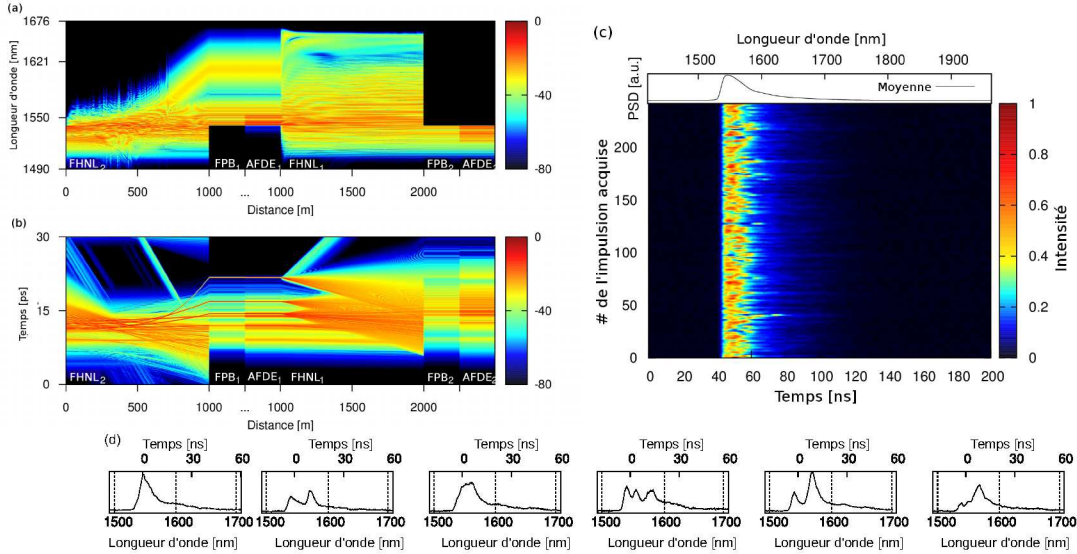


FIGURE 2 : (a) Propagation d'impulsions dans la cavité dans le domaine du spectral, et (b) dans le domaine du temps. (c) Mesures spectrales impulsion-par-impulsion. (d) Quelques spectres issus de (c).

3. RÉSULTATS & DISCUSSION

Les simulations de la figure 2 illustrent l'opération de la source lorsque FPB_1 est un filtre passe-bas, et FPB_2 un filtre passe-haut. Dans ce cas limite, un nombre minimal de composantes spectrales sont perdues par filtrage. Le rôle de chacun des CNLs est illustré dans le domaine spectral de la figure 2(a). En particulier, un SC est induit dans le CNL_2 par instabilité de modulation (IM), puisque l'impulsion initiale a une durée de l'ordre de la pico-seconde. Afin de vérifier que l'IM est réellement responsable de la génération d'un SC en C_3 , des mesures spectrales sont réalisées impulsion par impulsion. Pour ce faire, ces dernières sont envoyées dans un milieu dispersif, afin que leur forme temporelle prenne la forme de leur propre spectre[10]. Ces mesures, présentées à la figure (c) et (d) indiquent effectivement la présence de différents solitons ayant subi un décalage vers le rouge qui leur est propre. En moyenne, le spectre résultant est plat comme observé précédemment[7]. Contrairement aux lasers mode-lockés traditionnels, la figure 2 indique qu'un train d'impulsions de diverses durées et longueurs d'onde centrales circulent dans la cavité, plutôt qu'une unique impulsion au taux de répétition de la cavité ou l'un de ses harmoniques. La figure 3 présente l'opération de la source à diverses largeurs de bande des FPBs ainsi que diverses séparation spectrales entre les filtres. La figure 3(II) indique la séparation maximale entre FPB_1 et FPB_2

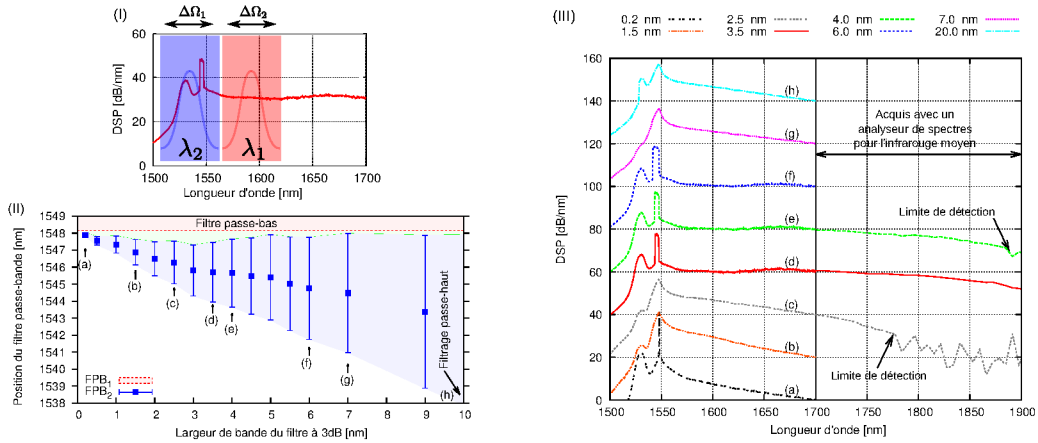


FIGURE 3 : (I) Degrés de liberté de la source : longueurs d'onde centrales $\lambda_{1,2}$ et bande passante $\Delta\Omega_{1,2}$. (II) Domaines de fonctionnement de la source, en fonction de la largeur de bande de FPB₂ et de $\lambda_1 - \lambda_2$. (III) Spectres correspondants en C₃.

pour laquelle la source démarre pour une puissance de pompe constante et une bande passante de FPB₂ variable. Finalement, la figure 3(III) illustre le SC associé aux paramètres de la figure 3(III).

4. CONCLUSION

Le fonctionnement d'une source régénérative basée sur l'auto-décalage fréquentiel de solitons a été étudié. Ce laser émet des trains d'impulsions qui s'étendent spectralement entre 1500 et 1900 nm.

Les auteurs remercient Pierre Galarneau pour les fructueuses discussions, ainsi que l'Institut National d'Optique (INO), à Québec, pour leur soutien financier.

RÉFÉRENCES

- [1] I. I. N. Duling, "All-fiber ring soliton laser mode locked with a nonlinear mirror," *Opt. Lett.*, vol. 16, no. 8, p. 539–541, 4 1991.
- [2] M. E. Fermann, F. Haberl, M. Hofer, and H. Hochreiter, "Nonlinear amplifying loop mirror," *Opt. Lett.*, vol. 15, no. 13, p. 752–754, 7 1990.
- [3] L. Dahlström, "Passive mode-locking and Q-switching of high power lasers by means of the optical Kerr effect," *Opt. Commun.*, vol. 5, no. 3, p. 157–162, 1972.
- [4] K. Kieu, J. Jones, and N. Peyghambarian, "Generation of sub-20fs pulses from an all-fiber carbon nanotube mode-locked laser system," in *Conference on Lasers and Electro-Optics*. Optical Society of America, 2010.
- [5] 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," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 20, no. 17, p. 1497–1499, 9 2008.
- [6] 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," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 25, no. 9, p. 1537–1547, 2008.
- [7] T. North and M. Rochette, "Broadband self-pulsating fiber laser based on soliton self-frequency shift and regenerative self-phase modulation," *Opt. Lett.*, vol. 37, no. 14, p. 2799–2801, 7 2012.
- [8] T. North, A. Al-kadry, and M. Rochette, "Analysis of Self-Pulsating Sources Based on Cascaded Regeneration and Soliton Self-Frequency Shifting," *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, vol. 20, no. 5, p. 1–7, 9 2014.
- [9] P. Mamyshev, "All-optical data regeneration based on self-phase modulation effect," in *Optical Communication, 1998. 24th European Conference on*, vol. 1. IEEE, 1998, p. 475–476.
- [10] P. Kelkar, F. Coppinger, A. S. Bhushan, and B. Jalali, "Time-domain optical sensing," *Electron. Lett.*, vol. 35, no. 19, p. 1661–1662, 1999.