

ÉLIMINATION DE L'AUTO-MODULATION DE PHASE DANS UN AMPLIFICATEUR OPTIQUE À FIBRE.

Frédéric Audo¹, Sonia Boscolo², Julien Fatome¹, Bertrand Kibler¹ and Christophe Finot¹

¹ *Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne, UMR CNRS 6303, Université de Bourgogne-Franche-Comté, 9 avenue Alain Savary, BP 47870, 21078 Dijon Cedex, France*

² *Aston Institute of Photonic Technologies, School of Engineering and Applied Science, Aston University, Birmingham B4 7ET, United Kingdom*

frederic.audo@u-bourgogne.fr

RÉSUMÉ

Nous proposons et démontrons expérimentalement une nouvelle technique simple et efficace pour combattre l'auto-modulation de phase qui dégrade les performances des amplificateurs à fibre. En appliquant une modulation de phase temporelle sinusoïdale, nous éliminons ainsi quasi-totalement l'élargissement spectral causé par l'effet Kerr.

MOTS-CLEFS : *propagation non-linéaire, fibre optique, modulation de phase*

1. INTRODUCTION

La propagation d'une impulsion dans une fibre optique non-linéaire est souvent accompagnée d'un élargissement de son spectre, causé par l'auto-modulation de phase (SPM) [1]. Cet effet est d'autant plus limitant dans le cas de l'amplification fibrée [2]. Des solutions telles que l'amplification à dérive de fréquence [3] permettent pour les impulsions brèves de limiter la phase non-linéaire accumulée, mais nécessitent des phases de pré-élargissement temporel et de recompression parfaitement ajustées. Même un faible niveau de SPM modifie alors la durée et la qualité de l'impulsion recomprimée. De plus, dans le cas d'impulsions longues (plusieurs dizaines de picosecondes), il n'est pas possible d'étirer suffisamment les impulsions.

Nous proposons une approche totalement nouvelle pour combattre l'élargissement spectral dû à l'auto-modulation de phase. Cette méthode consiste à moduler la phase temporelle de l'impulsion en entrée de la fibre par un simple signal sinusoïdal. Avec une fréquence et une amplitude adéquates, la phase sinusoïdale appliquée en entrée permet d'éliminer le chirp de l'impulsion temporelle après propagation dans la fibre optique et de compenser efficacement l'élargissement du spectre sans déformer la forme temporelle. Après avoir validé numériquement son principe, nous démontrons expérimentalement cette méthode dans le cas de l'amplification fibrée.

2. PRINCIPE DE LA COMPENSATION PAR UNE MODULATION DE PHASE SINUSOÏDALE

Pour introduire notre approche, considérons une impulsion gaussienne de profil temporel $u(t)$, avec une puissance crête P_0 et une demi largeur T_0 à $1/e$. Lors de la propagation dans une fibre non-linéaire de longueur L , l'auto-modulation de phase $\varphi_{NL}(t)$ engendre un chirp non-linéaire [1] $\delta\omega_{NL}(t) = -d\varphi_{NL}(t)/dt = -B \cdot (1-t^2/T_0^2) \cdot u(t)$, avec B le décalage de phase maximum (intégrale B) défini par $\gamma P_0 L_{eff}$, avec γ le coefficient non-linéaire de la fibre, et $L_{eff} = (1 - \exp(-\alpha L))/\alpha$ sa longueur effective, α étant le coefficient d'atténuation.

Suite à sa propagation dans une fibre non-linéaire, le profil d'intensité temporel d'une impulsion avec 1 W de puissance-crête et 120 ps de largeur à mi-hauteur reste inchangé (Fig. 1(a)). Néanmoins, son profil de chirp est significativement altéré par la SPM (Fig. 1(b)), conduisant à un élargissement notable du spectre optique (Fig. 1(c) et (d)). Notre approche, inspirée de récents travaux numériques menés dans le cadre de la compression spectrale [4], s'appuie sur la constatation que le chirp non-linéaire est très proche d'une forme sinusoïdale. Pour l'annuler, nous mettons donc en œuvre une modulation externe sinusoïdale : $\varphi_C(t) = A \cdot \cos(\omega_C t + \phi_0)$, avec A

l'amplitude, ω_C la fréquence angulaire et $\phi_0 = \pi$. Pour une impulsion Gaussienne, A et ω_C peuvent être déterminés analytiquement : $\omega_C = \pi/(T_0\sqrt{2})$ et $A = 2 \cdot B \cdot \exp(-1/2)/\pi$.

En appliquant une telle modulation sinusoïdale externe, le chirp total s'annule quasiment dans la partie centrale de l'impulsion et le spectre est corrigé de l'élargissement en sortie de la fibre (Fig. 1, courbe orange). Le profil temporel reste toujours inchangé. Des simulations complémentaires indiquent que des niveaux de SPM aussi élevés que $B = 10$ rad peuvent être corrigés.

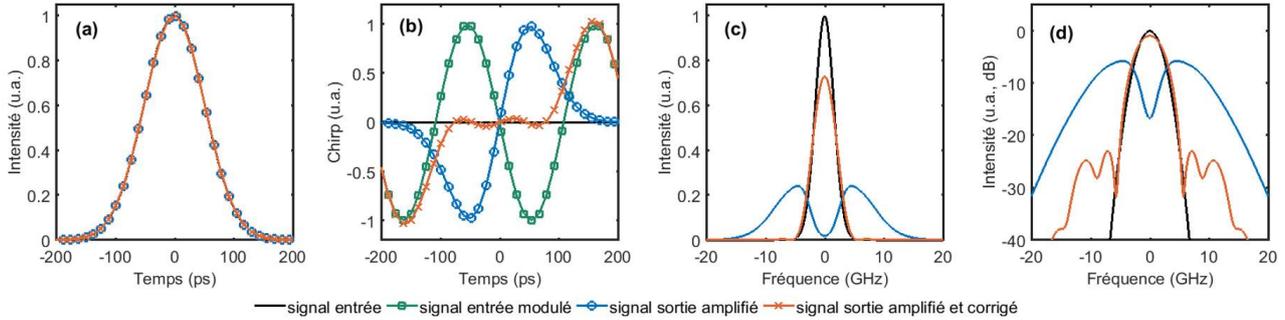


Fig. 1 : (a) Profil temporel de l'impulsion, (b) chirp temporel, (c) spectre optique de l'impulsion en échelle linéaire, et (d) spectre en échelle logarithmique, du signal en entrée de la fibre optique, puis en entrée de la fibre avec la modulation de phase (uniquement pour le chirp), du signal en sortie de la fibre, avec $P_0 = 1$ W, sans et avec correction due à la modulation en phase.

3. VALIDATION EXPÉRIMENTALE DANS LE CADRE D'UN AMPLIFICATEUR RAMAN

Le dispositif expérimental employé pour valider notre concept est présenté sur la Fig. 2 pour un amplificateur Raman fonctionnant aux longueurs d'onde des télécommunications optiques. Une source continue à 1550 nm est modulée en intensité grâce à un modulateur en LiNbO₃. Un générateur de données associé à une horloge à 10 GHz, crée une impulsion électrique qui, après être filtrée par un passe-bas de fréquence 5.4 GHz, permet d'obtenir la forme attendue. L'impulsion optique résultante (Fig. 3(a)) a une largeur à mi-hauteur de 120 ps pour un taux de répétition de 100 MHz. Le signal est ensuite modulé en phase : un second générateur, synchronisé avec le premier, délivre le signal sinusoïdal à la fréquence de 4 GHz, à un modulateur externe fibré en LiNbO₃. Le signal est ensuite amplifié par un amplificateur de type EDFA avant la fibre optique non-linéaire qui est longue de 500 m avec $\gamma = 10 \text{ W}^{-1}/\text{km}^{-1}$, une atténuation linéaire $\alpha = 0,7 \text{ dB}/\text{km}$ et une dispersion normale $D = -1 \text{ ps}/\text{km}/\text{nm}$. Un atténuateur variable permet d'ajuster la puissance en entrée de fibre. L'amplificateur Raman réalisé repose sur un laser de pompe Raman continu émettant à 1455 nm et couplé dans la fibre de manière contra-propagative grâce à deux multiplexeurs. Le signal est caractérisé de manière temporelle avec une photodiode et un oscilloscope électrique de bande passante de 40 GHz. La caractérisation spectrale est réalisée avec un analyseur de spectre optique à haute résolution (100 MHz).

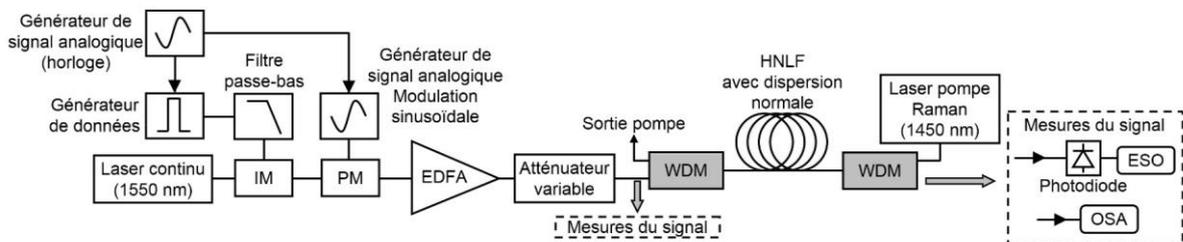


Fig. 2 : Dispositif expérimental pour la compression spectrale d'une impulsion amplifiée se propageant dans une fibre non-linéaire. (IM : modulation d'intensité ; PM : modulation de phase ; EDFA : amplificateur fibré ; HNLf : fibre hautement non-linéaire ; WDM : multiplexeur ; OSA : analyseur de spectre optique ; ESO : oscilloscope à échantillonnage électrique).

Nos résultats expérimentaux obtenus pour un gain de 9 dB conduisant à une intégrale B de 4.5 rad sont présentés Fig. 3. Le profil temporel est légèrement asymétrique mais reste inchangé après la propagation (Fig. 3(a)), sans ou avec correction. Le gradient du profil temporel montre que le chirp induit par SPM s'approche fortement du profil sinusoïdal (Fig. 3(b)). En l'absence de correction, le spectre s'étend significativement, sa largeur faisant plus que doubler. La correction par modulation de phase externe permet d'annuler en très grande partie cet élargissement pour retrouver un spectre proche de l'original. Quelques piédestaux à un niveau inférieur à -17 dB restent néanmoins visibles et sont liés à une compensation non-parfaite. Comme le montre la Fig. 4, nous pouvons de plus vérifier que la modulation de phase sinusoïdale corrige efficacement l'élargissement spectral, quel que soit le gain apporté au signal.

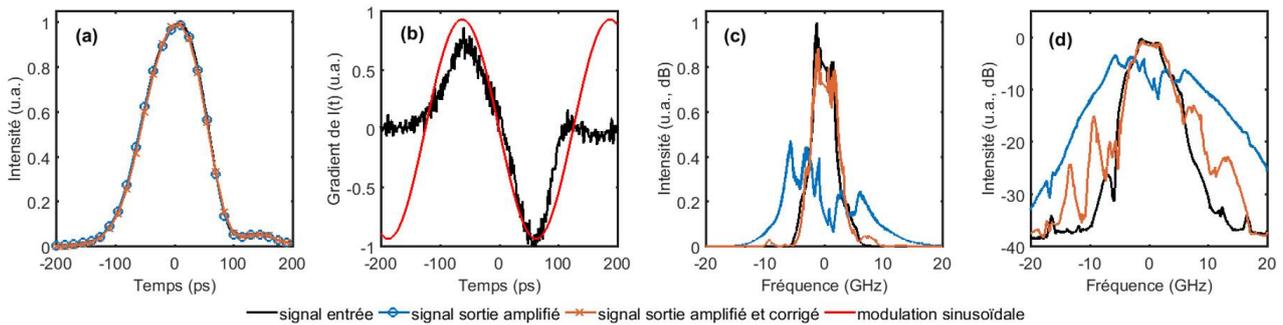


Fig. 3 : (a) Profil temporel de l'impulsion, (b) gradient de l'intensité temporelle comparé à la modulation de phase, (c) spectre optique de l'impulsion en échelle linéaire, et (d) spectre en échelle logarithmique, pour le signal en entrée de la fibre optique, le signal en sortie de la fibre, avec une amplification de 9 dB ($P_{\text{signal sortie}} = 14 \text{ dBm}$), sans et avec correction.

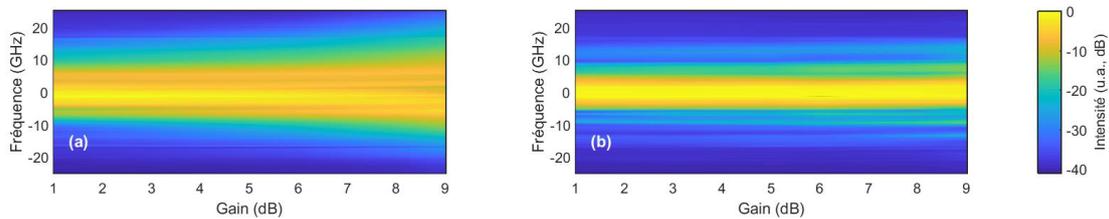


Fig. 4 : Evolution du spectre optique du signal amplifié en sortie de la fibre optique en fonction du gain de l'amplificateur Raman : (a) sans correction externe de la SPM, (b) avec modulation de phase appliquée.

L'ensemble de ces résultats démontre qu'une simple modulation temporelle externe de la phase par une onde sinusoïdale permet d'éliminer et de compenser l'élargissement provoqué par l'auto-modulation de phase lors de la propagation dans une fibre non-linéaire. Combiné éventuellement avec l'amplification à dérive de fréquence, cette approche ouvre de toutes nouvelles perspectives pour surmonter les dégradations imputées à la non-linéarité Kerr des fibres.

RÉFÉRENCES

- [1] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, Fourth Edition, Academic Press, San Francisco, CA, 2006.
- [2] D. J. Richardson, J. Nilsson, and W. A. Clarkson, "High power fiber lasers: current status and future perspectives," *J. Opt. Soc. Am. B* vol. 27, pp. B63-B92, 2010.
- [3] D. Strickland and G. Mourou, "Compression of amplified chirped optical pulses," *Opt. Commun.*, vol. 56, pp. 219-221, 1985.
- [4] S. Boscolo, L. K. Mouradian, and C. Finot, "Enhanced nonlinear spectral compression in fiber by external sinusoidal phase modulation," *J. Opt.* vol. 18, 105504, 2016.