

## Simulation d'une source tout optique débitant des impulsions à ultra-haut débit (320 Gb/s)

### Simulation of an all-optical source delivering ultra-high-speed pulses (320 Gb/s)

Amar Hamouda<sup>1</sup> & Kaddour Saouchi

Laboratoire des Etudes et Recherches des Instruments et Communications de Annaba (LERICA)  
Département d'Electronique, Université Badji Mokhtar, BP 12, Annaba, 23000, Algérie.

Soumis le : 15/06/2016

Révisé le : 17/10/2017

Accepté le : 18/10/2017

#### المخلص

هذا العمل هو تطور يسمح لنا بتقديم مولد كل ضوئي لنبضات جد قصيرة ذات عرض زمني مقداره 1.6 بيكو ثانية ، ذو مخرج بتدفق جد عال يقدر ب 320 جيجا بت\ثا، لنظام نقل البيانات عبر الألياف البصرية. وبواسطة هذا المولد يمكن أن نضمن العديد من تعليمات التحكم في نفس الوقت والتي تعد ضرورية ولا يمكن الاستغناء عنها في مجال الاتصال.

*الكلمات المفتاحية: التطور-التدفق-الألياف البصرية-النقل-الاتصالات*

#### Résumé

Ce travail a permis de présenter le développement d'un générateur tout optique d'impulsions ultra-courtes à une largeur temporelle de 1.6 ps, à un ultra-haut haut débit de 320 Gb/s, pour un système de transmission par fibre optique. A partir de ce générateur on peut assurer plusieurs commandes simultanées nécessaires et inévitables en télécommunication.

*Mot-clé: Le développement-débit-fibre optique-transmission-télécommunication.*

#### Abstract

This work allowed to present the development of an all-optical generator of ultra-short pulses with a temporal width of 1.6 ps, with an ultra-high broadband of 320 Gb/s, for a system of transmission by optical fiber. From this generator it is possible to ensure several simultaneous commands necessary and unavoidable in telecommunication.

*Keyword: the development-speed-fiber optic-transmission-telecommunication.*

<sup>1</sup> Auteur correspondant : amarhamouda23@gmail.com

## 1. INTRODUCTION

Les générateurs d'impulsions lumineuses ultra-courtes, à différentes fréquences de répétition, sur porteuse 1555 nm de longueur d'onde, sont largement employés dans de nombreuses applications scientifiques [1, 2, 3], notamment pour les systèmes de transmission par fibre optique à très haut débit, test des composants optoélectroniques, générateur pour horloge de précision.

Les techniques du remodelage du signal initial dans une fibre optique par des effets non-linéaires sont des méthodes qui ont prouvé leurs efficacités pour générer ce type de générateurs telles que la compression adiabatique [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]. La compression d'un battement sinusoïdal, dans une fibre de dispersion chromatique anormale, via le processus de mélange à quatre ondes multiple(MFWM. : *Multiple Four WaveMixing*), est une technique relativement simple à mettre en œuvre expérimentalement et qui permet de générer des trains d'impulsions ultra-courtes, de haute qualité, en limite de Fourier et sans piédestal [11, 12].

Dans le cadre de cette approche, il est possible de générer le battement sinusoïdal initial par couplage de deux diodes laser continues(CW), dont l'écart en fréquence est égal à la fréquence souhaitée. L'avantage principal de cette technique est d'atteindre des fréquences très élevées dépassant largement celles délivrées par les systèmes électroniques (limités à 40 GHz) [12, 13].

Cependant, en absence de précautions particulières, l'instabilité spectrale des deux diodes due à la fluctuation de la largeur de raie entre 1 et 5 MHz introduit une gigue temporelle importante sur le profil d'intensité finale. La modulation en intensité d'une seule diode laser en continue(CW), apparaît alors comme une excellente alternative pour générer un battement sinusoïdal plus stable.

Ce nouveau type de générateurs optiques trouve son application dans différents domaines d'activité comme la métrologie, la mesure de distances inter-satellites, l'étude de puces ou de composants plasmoniques dans le domaine des nanotechnologies ou encore pour le développement d'horloge tout-optique. Notons également que ce type de générateurs, est modulable et peu onéreux.

## 2. ETUDE THEORIQUE DU GENERATEUR

Pour les systèmes de transmission à haut débit par fibre optique basés sur le multiplexage temporel optique(OTDM.), ou le multiplexage en longueur d'onde(WDM), les opérations de synchronisation, détection, modulation, peuvent s'opérer par canal unique, ce qui entraîne l'utilisation de plusieurs générateurs à sortie unique à des débits différents. Cet encombrement d'appareils peut être contourné par l'utilisation d'un seul générateur multi-sorties.

### 2.1 Architecture du générateur

Le montage du générateur se compose de cinq blocs ayant une sortie délivrant un débit de 320 Gb/s stable et sans giges temporelles (voir fig. 1).

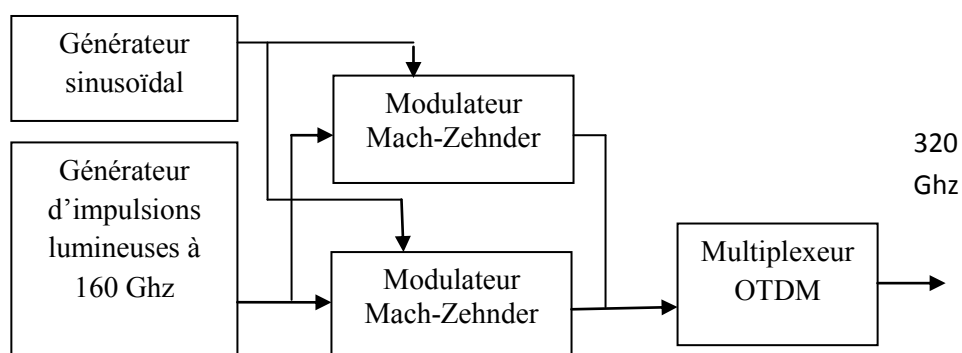


Figure. 1 Schéma synoptique du générateur à 320 Gb/s.

#### 2. 1. 1 Générateur d'impulsions lumineuses à 160 Ghz

Ce générateur [14] est composé de quatre blocs en série, assure une fréquence de répétition de 160 Ghz par la méthode de compression non linéaire de battement sinusoïdale via un processus de

mélange à quatre ondes[15, 16], alimente après le codage et le couplage le multiplexeur OTDM[17, 18, 19, 20] composé de deux branches[21, 22] (voir fig. 2).

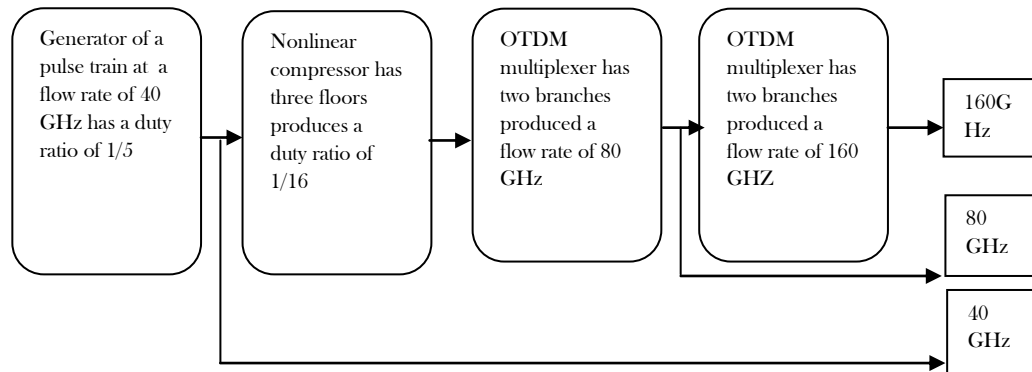


Figure. 2 Générateur d'impulsions lumineuses à une fréquence de répétition de 160 GHz [14].

### 2. 1. 2 Générateur sinusoïdal

Ce bloc est une source d'ondes submillimétriques à ultra- haute fréquence de 460 GHz[23], qui pilote le modulateur Mach-Zehnder à son point de transmission nulle (voir fig. 3).

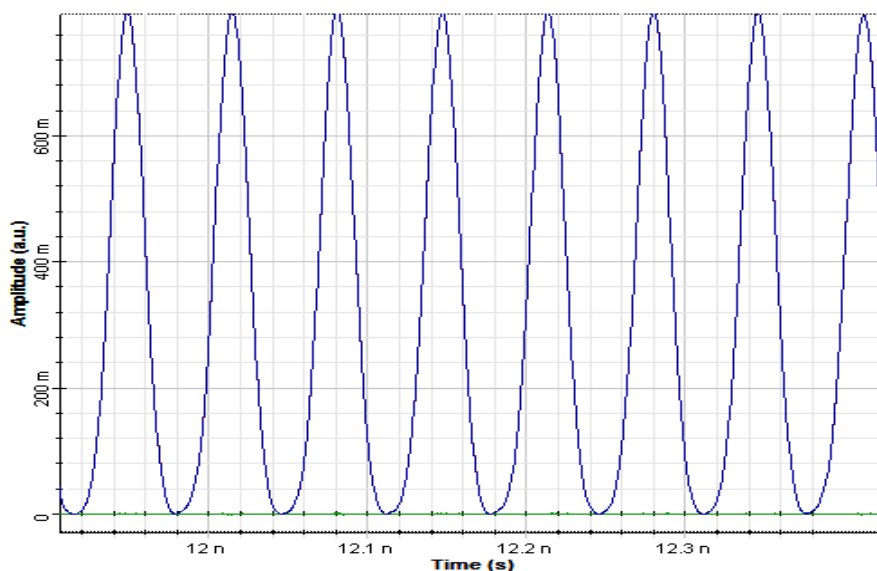


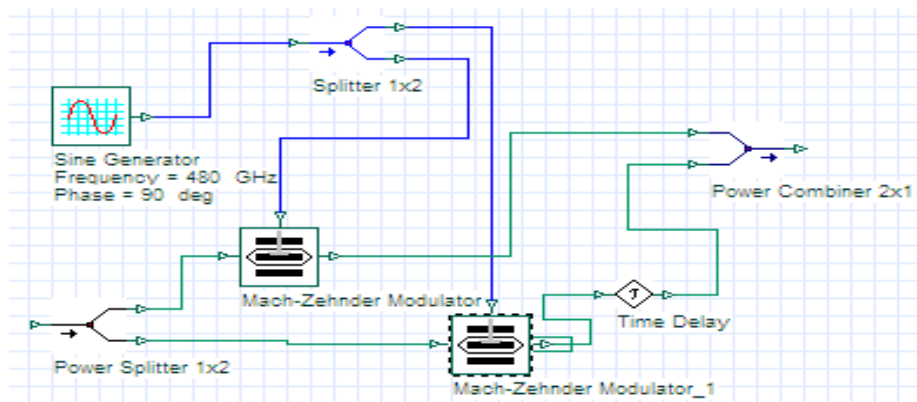
Figure . 3 : Signal de commande du modulateur Mach-Zehnder.

### 2. 1. 3 Modulateurs Mach-Zehnder

Ces deux composants sont des modulateurs d'amplitude, après le pilotage de chacun par le générateur de sinusoïdal précédent, ils délivrent un train d'impulsions solitoniques ayant une fréquence de répétition de 160 GHz pour chaque sortie du modulateur.

### 2. 1. 4 Le multiplexeur OTDM

Ce dernier bloc (voir fig.4), est un deuxième multiplexeur OTDM constitué de deux branches dont l'une des deux branches retarde le train d'impulsions par rapport à l'autre d'une durée  $\tau$  ( $\tau =$  la durée de l'impulsion/le nombre de branches) afin de disposer à sa sortie un débit de 320 Gb/s.



### 2.2 Modélisation de la propagation des impulsions lumineuses

Une impulsion lumineuse, d'enveloppe lentement variable  $A(0,t)$ , qui se propage dans une fibre optique peut être décrite par l'équation de Schrödinger non linéaire générale suivante[24, 25, 26]:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + i \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A}{\partial t^3} + \frac{\alpha_L}{2} A - i \gamma |A|^2 A + i \gamma T_r \frac{\partial |A|^2}{\partial t} A + \frac{\gamma}{\omega_0} \frac{\partial (|A|^2 A)}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

Dans notre cas, on a négligé les effets de dispersion chromatique d'ordre 3, l'effet Raman et l'effet d'auto-raïdissement. On obtient ainsi l'équation suivante :

$$\frac{\partial A}{\partial z} + i \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \frac{\alpha_L}{2} A - i \gamma |A|^2 A = 0 \quad (2)$$

Théoriquement, les effets de la dispersion sont exprimés par le développement limité en série de Taylor de la constante de propagation autour de la fréquence de la porteuse comme suivant :

$$\beta(\omega) = \frac{\omega}{c} n(\omega) = \beta_0 + \beta_1(\omega - \omega_0) + \frac{\beta_2}{2}(\omega - \omega_0)^2 + \frac{\beta_3}{6}(\omega - \omega_0)^3 + \dots + \frac{\beta_m}{m!}(\omega - \omega_0)^m \quad (3)$$

Alors que  $\beta_2$  traduit le fait que deux fréquences voisines voient une vitesse de groupe différente. Il est communément appelé coefficient de dispersion de la vitesse de Groupe ( $\beta_2$ ).

Cependant, la communauté scientifique des télécommunications préfère l'utilisation d'un autre paramètre  $D$  en (ps/(nm.km)). Les deux paramètres sont liés par la relation suivante :

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \quad (4)$$

$L_D$  est la distance au bout de laquelle l'impulsion initiale d'une largeur temporelle à  $1/e$  de  $T_0$  s'est élargie d'un facteur  $\sqrt{2}$  et s'exprime comme suit :

$$L_D = \frac{T_0^2}{|\beta_2|} \quad (5)$$

Un champ électrique incident est modulé autour d'une porteuse à  $\omega_0$ , modifié par sa seule présence l'indice du milieu qu'il traverse. Cette modification provenant de l'effet Kerr est décrite par le profil de la puissance  $P(z, t) = |A(z, t)|^2$  Comme l'indique l'équation:

$$n = n_0 + \frac{P(z,t)}{A_{eff}} \quad (6)$$

$n_0$  : l'indice de réfraction normal,  $n_2$  est l'indice de réfraction non linéaire,  $A_{eff}$  représente la section effective de la fibre.

Le coefficient de Kerr  $\gamma$  s'exprime par l'équation suivante :

$$\gamma = \frac{\omega_0 n_2}{c A_{eff}} \quad (7)$$

Le déphasage provient de l’auto modulation de phase est donné par l’expression suivante:

$$\varphi_{NL} = \gamma |A(0, t)|^2 z \quad (8)$$

La longueur de la fibre pour laquelle les effets non linéaires deviennent importants s’exprime par l’équation suivante :

$$L_{NL} = \frac{1}{\gamma P_0} \quad (9)$$

A Partir du critère  $L_D=L_{NL}$  on peut décrire l’impulsion solitonique [27], proposée en 1973 par Hasegawa et Tapper sous la forme d’une sécante hyperbolique.

$T_0$  est la largeur temporelle à  $1/e$  de l’impulsion, Ainsi :

$$P_0 = \frac{\beta_2}{\gamma T_0^2} \quad (10)$$

### 3. CARACTERISTIQUES ET VALEURS DES PARAMETRES DES COMPOSANTS

A partir des équations (1,...,10), on peut trouver les valeurs et les paramètres des composants du montage (voir Tab. 1 et Tab. 2) :

Tab. 1 : Caractéristiques et paramètres des fibres optiques.

Fibre	Paramètre	Symbole	Valeur
Fibre 1 DCF(Dispersion Compensating Fiber)	Longueur de fibre	$L_1$	1.25 Km
	Dispersion chromatique	$D_1$	-100 ps/(nm.Km)
	Coefficient Kerr non-linéaire	$\gamma_1$	$1.05 \text{ W}^{-1}.\text{Km}^{-1}$
Fibre 2 SMF(Standard Fiber)	Longueur de fibre	$L_2$	2.18 Km
	Dispersion chromatique	$D_2$	15.75 ps/(nm.Km)
	Coefficient Kerr non-linéaires	$\gamma_2$	$1.6 \text{ W}^{-1}.\text{Km}^{-1}$
Fibre 3 NZ-DSF(Non-Zéro Dispersion Shifted Fiber)	Longueur de fibre	$L_3$	1.33 Km
	Dispersion chromatique	$D_3$	-1.7 ps/(nm.Km)
	Coefficient Kerr non-linéaires	$\gamma_3$	$1.42 \text{ W}^{-1}.\text{Km}^{-1}$
Fibre 4 HNLF(High Non-Linear Fiber)	Longueur de fibre	$L_4$	0.75 km
	Dispersion chromatique	$D_4$	-0.30 ps/(nm.Km)
	Coefficient Kerr non-linéaire	$\gamma_4$	$8.5 \text{ W}^{-1}.\text{Km}^{-1}$
	Dispersion slope	$S_4$	$0.07 \text{ ps}/(\text{nm}^2.\text{Km})$
	Coefficient de perte	$\alpha_L$	1.24 dB/Km
Fibre 5 SMF 28	Longueur de fibre	$L_5$	0.145 Km

(Standard Fiber)	Dispersion chromatique	$D_5$	15.5 ps/(nm.Km)
	Coefficient Kerr non-linéaire	$\gamma_5$	1.45 W <sup>-1</sup> .Km <sup>-1</sup>

Tab. 2 : Valeurs et paramètres des composants du montage simulé.

Composant	Paramètre	Symbole	Valeur
Source laser	Longueur d'onde	L	1555 nm
	Puissance	P	6.95 dBm
Modulateur Mach-Zehnder 1	Tension d'extinction	$zU_{\text{ext}}$	23 v
	Tension de bias	$V_b$	9.5 v
Modulateur Mach-Zehnder 2	Tension d'extinction	$U_{\text{ext}}$	29 v
	Tension de bias	$V_b$	4.68 v
Amplificateur EDFA 1	Puissance de sortie maximale	$P_{s,\text{max}}$	13 dBm
Amplificateur EDFA 2	Puissance de sortie maximale	$P_{s,\text{max}}$	28 dBm
générateur sinusoïdal	Signal de la porteuse	$f_{\text{max}}$	350 Ghz

#### 4. SIMULATION NUMERIQUE

Face à la complexité croissante des architectures et systèmes développés, les outils de simulation ont acquis un rôle important. Ils sont de plus en plus utilisés afin d'optimiser les paramètres qui interviennent dans la réalisation d'un système. Ils permettent de prévoir des résultats attendus expérimentalement. Ils permettent désormais également d'utiliser lors d'une simulation, des éléments expérimentaux tels que des signaux relevés avec des appareils de mesure ou encore des courbes caractéristiques de composants réels. Dans tout ce qui suit l'outil de simulation utilisé est l'OPTISYSTEM version 7 [28].

#### 5. RESULTATS ET DISCUSSIONS

A partir du même principe de fonctionnement du générateur d'impulsions lumineuses ultra-courtes[1], l'auteur a généré un train d'impulsions lumineuses ultra-courtes [29, 30] à un débit de 160 Gb/s par un montage ayant des composants coûteux, alors que le système présenté dans cet article, construit avec des composants moins chers délivre un train d'impulsions lumineuses ultra-courtes à un débit de 320 Gb/s stables et sans gigue.

A partir des valeurs des paramètres cités précédemment (voir Tab. 1 et tab. 2), on a obtenu par simulation sur le logiciel OPTISYSTEM version 7 les résultats suivants :

La modification du troisième bloc du générateur [14] afin de prendre en compte des paramètres non linéaires significatifs pour un régime de propagation solitonique(voir fig. 5), nous a permis de générer un train d'impulsions solitoniques de durée égale à 1.85 ps (voir fig. 6).

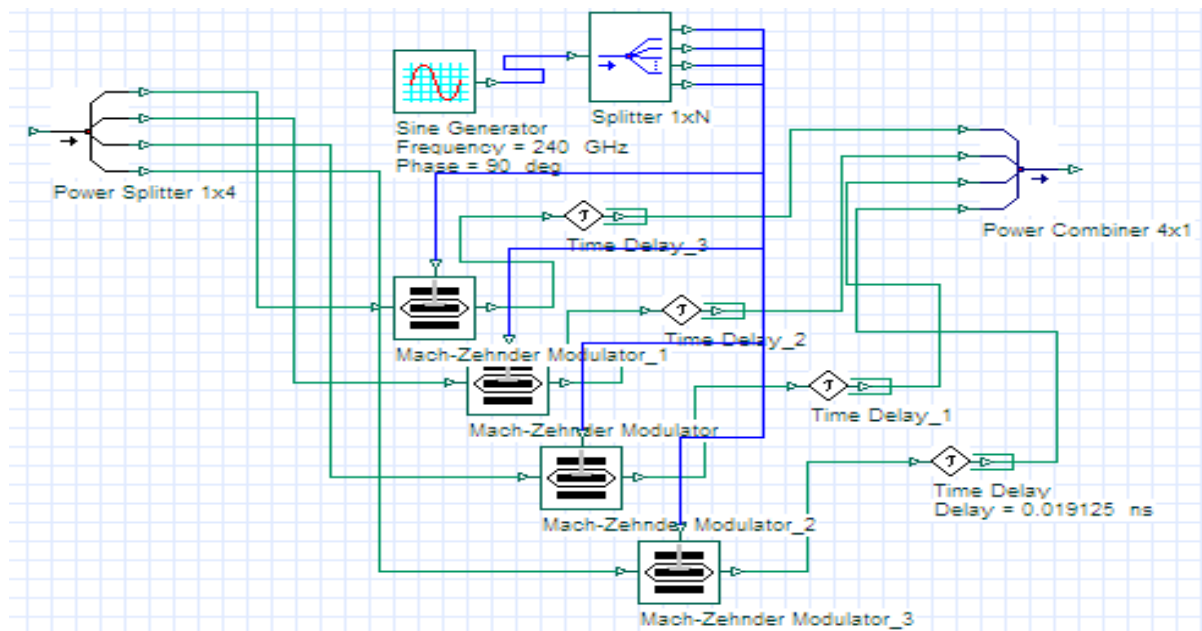


Figure. 5 Schéma du montage simulé comportant quatre modulateurs Mac-Zehnder et le multiplexeur OTDM [14].

Finalement ces impulsions attaquent l'entrée des 2 modulateurs Mach-Zehnder (commandés par les générateurs UHF vus précédemment) dont l'une des sorties est retardée par rapport à l'autre d'une durée égale à 3.187 ps (voir fig.6).

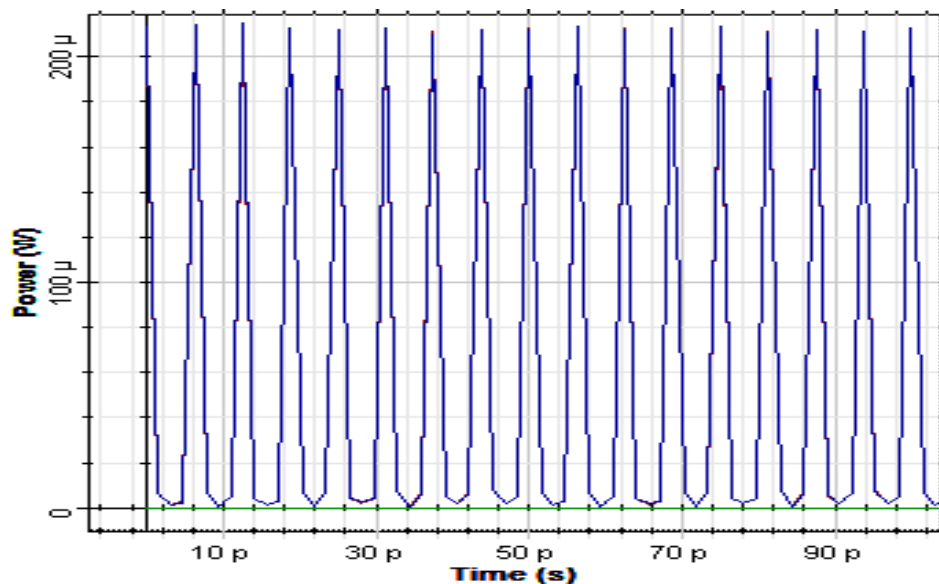


Figure.6 Le train d'impulsions à 160 Gb/s à la sortie du générateur après modification[14].

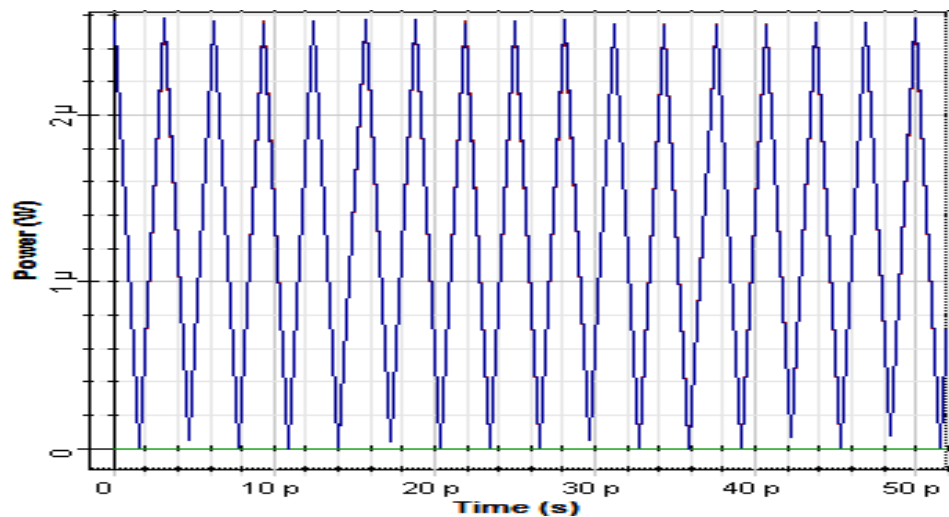


Figure. 7 Train d'impulsions cadencées à 320 Gb/s délivré à la sortie du dernier bloc à une durée de 1.6 ps.

## 6. CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons développé un générateur à une longueur d'onde de 1555 nm fournissant des impulsions picosecondes à une cadence de 320 Gb/s. Notre générateur est basé sur une méthode de battement par modulation d'intensité sur Mach-Zehnder, de compression et de multiplexage par division temporelle optique (OTDM) [31, 32, 33]. Le train d'impulsions à 320 Gb/s ainsi réalisé est constitué d'une succession d'impulsions régulièrement espacées de largeur à mi-hauteur 1.6 ps en limite de Fourier et stables. Ces résultats sont obtenus, après étude et modélisation par simulation numérique sur le logiciel OPTISYSTEM version 7.

## REFERENCES

- [1] El Mansouri I., 2013. Sources impulsionnelles picosecondes tout optique à très haut débit: applications aux télécommunications optiques thèse de doctorat en physique de l'Université de Bourgogne, France, 152p
- [2] Fatome J., 2004. Propagation d'impulsions ultra-courtes à 160-Gb/s dans des lignes de fibres optiques gérées en dispersion, thèse de doctorat en physique Université de Bourgogne, France, 217p.
- [3] Khalil M., 2008. Etude d'un système bas coût de transmission optique par multiplexage temporel, Traitement du signal et de l'image, thèse de doctorat en Electronique de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, France, 163p
- [4] Le Floch S. and Cambon P., 2003. Theoretical evaluation of the Brillouin threshold and the steady-state Brillouin equations in standard single-mode optical fibers, *Journal Optical Society American A*, Vol. 20(6), 1132–1137.
- [5] Fatome J., Pitois S., and Millot G., 2006. 20-GHz-to-1-THz repetition rate pulse sources based on multiple four-wave mixing in optical fibers, *Journal of Quantum Electronics, IEEE*, Vol. 42(10), 1038–1046.
- [6] Khemiri S., Ware C., Gabet R., and Erasme D., 11 GHz short pulse clocked optical source based on four-wave mixing in an optical fibre, In: International Conference on Electronic Circuits and System (ICECS) IEEE, 1–5.
- [7] Inoue T. and Namiki S., 2008. Pulse compression techniques using highly nonlinear fibers, *Laser & Photonics Reviews*, Vol. 2(12), 83–99.
- [8] Wiberg A.O.J., Brès C.S., Kuo B.P.P., Zhao J.X., Alici N., and Radic S., 2009. Pedestal-free pulse source for high data rate optical time-division multiplexing based on fiber-optical parametric processes, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. 45(11), 1325–1330.
- [9] Slavik R., Parmigiani F., Grüner-Nielsen L., Jakobsen D., Herstrøm S., Petropoulos P., and Richardson D.J., 2011. Stable and efficient generation of high repetition rate (> 160 GHz) subpicosecond optical pulses, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol 23(9), 540–542.
- [10] Chen J., Lou C., Huo L., and Lu D., 2011. 1.4 ps pedestal-free low timing jitter 10 GHz pulse source using commercial cascaded LiNbO<sub>3</sub> modulators and fiber-based compressor, *Applied Optics Letters*, Vol. 50(14), 1979–1983.
- [11] Smith R. G., 1972. Optical Power Handling Capacity of Low Loss Optical Fibers as Determined by Stimulated Raman and Brillouin Scattering, *Applied Optics Letters*, Vol. 11(11), 2489–2494.



- [12] Mamyshev P.V., 1998. All-optical data regeneration based on self-phase modulation effect, In: European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC) IEEE, 475–476.
- [13] Fatome J., Pitois S., Fortier C., Kibler B., Finot C., Millo tG., Courde C., Lintz M., and Samain E., 2010. Multiple four-wave mixing in optical fibers: 1.5–3.4-THz femtosecond pulse sources and real-time monitoring of a 20-GHz picosecond source, In: *European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC) IEEE*, Vol. 283(11), 2425–2429.
- [14] Hamouda A., Saouchi K., 2017. Breves generator of pulses has different flow rates(40 Ghz, 80 Ghz and 160 Ghz), *journal of JNTM*, Vol. 7(01), 27-32.
- [15] Trillo S., Wabnitz S., and Kennedy T.A.B., 1994. Nonlinear dynamics of dual-frequency-pumped multiwave mixing in optical fibers, *Physics. Review A*, Vol. 50(2), 1732–1747.
- [16] Chluda C., 2006. Bruit basse et moyenne fréquence des amplificateurs optiques distribués à effet Raman, PhD thesis on physics, university of Montpellier 2, France, 187p.
- [17] D Errico A., Loiacono C., Presi M., Contestabile G., and Ciaramella E., 2003. Widely tunable 40 GHz pulse source for 160 Gbit/s OTDM by simultaneous soliton generation and compression, In: European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC) IEEE, 578-580.
- [18] Chen Y. K., Hu C. J., Lee C. C., Feng K. M., Lu M. K., Chung C. H., Tu Y. K., and Tzeng S. L., 2000. Low-crosstalk and compact optical add-drop multiplexer using a multiport circulator and fiber Bragg gratings, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 12, 1394–1395.
- [19] Prucnal P. R., Santoro M., and Tan F., 1986. Spread spectrum fiber-optic local area network using optical processing, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 4(10), 547–554.
- [20] Kim S., Yu K., and Park N., 2000. A new family of space/wavelength/time spread three dimensional optical code for OCDMA networks, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 18(4), 502-511.
- [21] Marcenac D.D., Ellis A.D. and Moodie D.G., 1998. 80Gbit/s OTDM using electroabsorption modulators, *Electronics Letters* Vol. 34(1), 101-103.
- [22] Kaman V. and Bowers J.E., 2000. 120 Gbit/s OTDM system using electroabsorption transmitter and demultiplexer operating at 30GHz, *Electronics Letters*, Vol. 36(17), 1477-1479.
- [23] Kefelan F., 2005. Corrélation du bruit de phase de lasers à réseau de Bragg par injection optique. Application à la génération et au transport sur fibre de signaux radio-fréquence, thèse de doctorat en Electronique de l'Institut National de Paris, France, 163p.
- [24] Agrawal G. P., 2001. Applications of Nonlinear Fiber Optics, Third edition. New York Academic press. 467p.
- [25] Béjot P., Kibler B., Hertz E., Lavorel B. and Fournier G., 2011. General approach to spatiotemporal modulational instability processes, *Physical Review A*, Vol. 83(1), 13–45.
- [26] Boyd R. W., 2008. Nonlinear optics, Academic press, 3rd edition Paris. 173p.
- [27] Hasegawa A. and Tappert F., 1973. Transmission of stationary nonlinear optical pulses in dispersive dielectric fibers. I. Anomalous dispersion, *Applied Physics Letters*, Vol. 23(3), 142-147.
- [28] Mohammadi S. O., Mozaffari S. & Shahidi M. M., 2011. Simulation of a transmission system to compensate dispersion in an optical fiber by chirp gratings, *International journal of the Physical Sciences*, Vol. 6(32), 7354-7360.
- [29] Tjörnhammar S., Pasiskevicius V. and Laurell F., 2013. Numerical modeling and determination of limiting powers for volume Bragg gratings used in lasers for spectral control, *Journal Optical Society American B*, Vol. 30(8), 2326-2332.
- [30] Lumeau J., Glebova L. and Glebov L., 2011. Near-IR absorption in high-purity photochromic refractive glass and holographic optical elements: measurement and application for high-energy lasers, *Applied Optics Letters*, Vol. 50(30), 5905-5911.
- [31] Tassev V., Snure M., Peterson R., Bedford R., Bliss D., Bryant G., Mann M., Goodhue W., Vangala, K. Termkoa, A. Lin, J. Harris, M. Fejer S., Yapp C. and Tetlak S., 2012. Epitaxial growth of quasi-phase matched GaP for nonlinear applications: Systematic process improvements, *Journal of Crystal Growth*, Vol. 352(1), 72-77.
- [32] Zukauskas A., Strömqvist G., Pasiskevicius V., Laurell F., Fokine M. and Canalias C., 2011. Fabrication of submicrometer quasi-phase-matched devices in KTP and RKTp (Invited), *Optics Materials Express*, Vol. 1(7), 1319-1325.
- [33] Beier F., Otto H.-J., Jauregui C., De Vries O., Schreiber T., Limpert J., Eberhardt R. and Tünnermann A., 2014. 1009 nm continuous-wave ytterbium-doped fiber amplifier emitting 146 W, *Optics Letters* Vol. 39(13), 3725-3727.

## NOMENCLATURES

MFWM : Multiple Four Wave Mixing.

OTDM : Optic Time Division Multiple.

WDM : Wide Div