

Modulation RZ-DPSK optique pour le réseau d'accès optique passif multiplexé en longueurs d'onde (WDM-PON)

Mawutin Martien Carlos AGOSSOU^{1*}, Léopold DJOGBE¹, Fréjus SANYA¹, Patrick SOTINDJO¹, Antoine VIANOU¹ et Christelle AUPETIT - BERTHELEMOT²

¹ *Laboratoire d'Electrotechnique, de Télécommunication et d'Informatique Appliquée (LETIA), Université d'Abomey-Calavi (UAC), 01 BP 2009 Cotonou, Bénin*

² *Xlim, UMR CNRS 7252, Université de Limoges, France*

* Correspondance, courriel : carlos.agossou@yahoo.fr

Résumé

Ce travail porte sur l'étude des performances du format de modulation RZ-DPSK (Return to Zero Differential Phase-Shift Keying) dans un système WDM-PON (Wavelength Division Multiplexing in Passive Optical Network) à un débit de 40 Gb/s par longueur d'onde, afin de répondre à la forte demande en débit observée dans les réseaux d'accès optiques actuels et de prochaines générations. Le système de transmission WDM-PON bidirectionnel étudié est simulé à l'aide du simulateur système OptiSystem 7.0, et la liaison est établie sur une distance de 25 km en utilisant des fibres monomodes et de compensation de dispersion chromatique. Un débit total de 320 Gb/s a été démontré pour l'ensemble des huit (08) longueurs d'onde utilisées. Les résultats du taux d'erreur binaire (BER : Bit Error Rate) en fonction de la puissance optique reçue (POR) montrent que le format RZ-DPSK présente non seulement de bonnes performances en transmission, mais aussi il est plus tolérant à la dispersion chromatique que le format NRZ-OOK (Non Return to Zero – On Off Keying).

Mots-clés : *modulation optique, NRZ-OOK, passive optical network (PON), RZ-DPSK, wavelength Division multiplexing (WDM), WDM-PON.*

Abstract

Optical RZ-DPSK modulation for wavelength division multiplexing passive optical access network (WDM-PON)

In this work, we studied the performance of RZ-DPSK (Return to Differential Phase Shift Keying) modulation for Wavelength Division Multiplexing in Passive Optical Network (WDM-PON) system at 40 Gb/s per wavelength, in order to satisfy high demand of data rate observed in current and next generation optical access networks. Bidirectional WDM-PON transmission system studied is simulated using OptiSystem 7.0 system simulator, and the link is established over 25 km using single mode and chromatic dispersion compensation fibers. A total of 320 Gb/s bit rate has been demonstrated for all eight (08) wavelengths used. Bit Error Rate (BER) results as a function of the received optical power show that RZ-DPSK format not only has good transmission performance, but also it is more tolerant to chromatic dispersion than the NRZ-OOK (Non Return to Zero - On Off Keying).

Keywords : *optical modulation, NRZ-OOK, passive optical network (PON), RZ-DPSK, Wavelength Division multiplexing (WDM), WDM-PON.*

1. Introduction

Le nombre croissant de nouveaux services et applications multimédias tels que la vidéo à la demande, les jeux interactifs en ligne, la télévision numérique haute définition, le cloud computing, les partages des fichiers multimédias sur les réseaux sociaux, l'internet des objets, engendre un impressionnant trafic de données dans les réseaux d'accès. Ceci exige la transmission haut débit au niveau de ces réseaux, afin de permettre l'acheminement des données jusqu'à l'utilisateur final [1]. De ce fait, la technologie Fiber To The Home (FTTH), qui consiste à faire parvenir via la fibre optique les données utilisateurs jusqu'à son terminal situé chez lui, a été largement adopté pour l'accès optique [2]. Afin d'utiliser efficacement la bande passante de ces fibres, il devient avantageux de multiplexer le trafic de plusieurs utilisateurs sur une même fibre. C'est ainsi que la technologie WDM-PON (Wavelength Division Multiplexing in Passive Optical Network) a été introduite dans le réseau d'accès en tant que solution pour répondre à la demande sans cesse grandissante de bande passante dans de tels réseaux [3, 4]. Cependant, la technologie WDM-PON impose l'utilisation de plusieurs longueurs d'onde dont la réduction de l'espacement inter-canal induit des dégradations sur le signal optique transmis au cours de sa propagation dans la fibre. Ces dégradations se justifient par les interférences inter-symboles (ISI) et inter-canal couplées avec les effets de propagation au sein de la fibre [3, 5].

Ces phénomènes sont d'autant plus accentués avec une augmentation de la distance et du débit binaire par canal, ce qui est assez nuisible notamment sur le format de modulation NRZ-OOK (Non Return to Zero - On Off Keying) le plus souvent utilisé [6, 7]. Dans le but de limiter ces effets, et améliorer les performances des systèmes WDM-PON, différentes études ont été effectuées sur le format RZ-DPSK (Return to Zero Differential Phase-Shift Keying) [8, 9]. En effet, le RZ-DPSK est un format de modulation à haute efficacité spectrale et de largeur spectrale réduite, plus élaboré que le NRZ-OOK [9]. Il consiste à utiliser la phase optique du signal pour coder les informations [6]. Des études réalisées sur un système WDM-PON bidirectionnel utilisant ce format avec quatre (04) canaux espacés de 60 GHz, ont permis de transmettre des données à un débit de 10 Gb/s par canal sur une distance maximale de 25 km [10, 11]. Récemment, il a été démontré la possibilité de transmettre des données modulées au format RZ-DPSK sur une distance de 12 km de fibre avec un débit total de 40 Gb/s [12]. Dans cet article, nous proposons d'étudier, par simulation, les performances en transmission du format de modulation RZ-DPSK dans un système WDM-PON bidirectionnel utilisant huit (08) longueurs d'onde à un débit de 40 Gb/s par longueur d'onde. En outre, une étude comparative est réalisée pour démontrer les performances de ce format par rapport au format NRZ-OOK traditionnellement utilisé dans les systèmes WDM-PON.

2. Matériel et méthodes

2-1. Présentation du système WDM-PON proposé

Pour générer les signaux optiques au format RZ-DPSK et évaluer les performances en transmission de ce format dans un système WDM-PON, nous avons développé un modèle en simulation pour l'émetteur RZ-DPSK optique et pour son récepteur associé. La modélisation de ces interfaces optiques, ainsi que du système WDM-PON proposé, a été réalisée à l'aide du simulateur système OptiSystem 7.0. La **Figure 1** présente la structure de l'émetteur RZ-DPSK. Après la génération de la séquence binaire aléatoire, les données sont codées et mise sous forme d'impulsion NRZ à l'aide du module de Précodage différentiel. Le **Tableau 1** présente en effet, la table de vérité pour ce précodage. Ces données sont envoyées au premier modulateur Mach-Zehnder (MZM) qui module la phase du signal optique issu du laser. Ensuite, ce signal optique est sur-modulé en intensité au moyen d'un second MZM, commandé par un signal électrique sinusoïdal de fréquence égale à la moitié de celle du signal optique. En effet, chaque bras du MZM se voit appliquer un signal d'amplitude V_{π} et $-V_{\pi}$. V_{π} étant la tension demi-onde du MZM. Ainsi, ce signal électrique centré sur un minimum de la fonction de

transfert du MZM, évolue entre deux maxima adjacents avec une amplitude $2V\pi$. Le changement de phase est alors imprimé, lorsqu'en quittant un maximum pour un autre, on transite par un minimum de la fonction de transfert du MZM. On obtient en sortie du MZM, un signal au format RZ-DPSK optique.

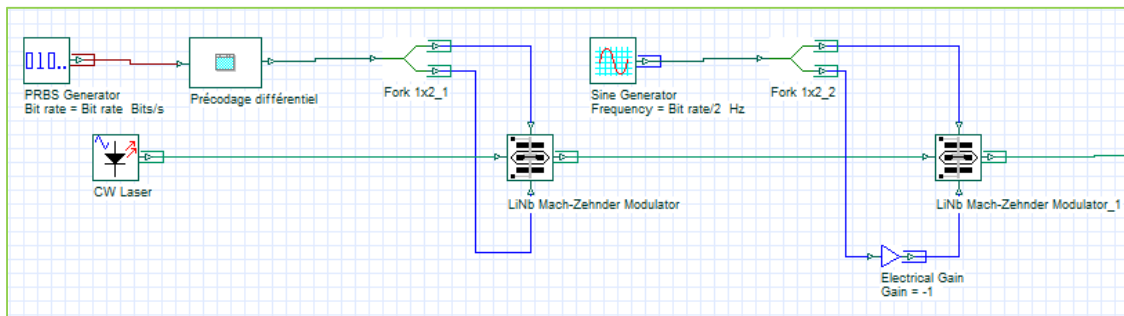


Figure 1 : Schéma de l'émetteur RZ-DPSK

Tableau 1 : Table de vérité du précodage RZ-DPSK[5].

$s(t)$	$p(t - 1)$	$p(t)$
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	1

où, $s(t)$ désigne le bit de la séquence initiale au temps t , (t étant normalisé par rapport au temps-bit), $p(t - 1)$ désigne le bit précédant celui de la séquence précodée au temps t , et $p(t)$ le bit de la séquence précodée au temps t . Ainsi, le précodage RZ-DPSK consiste donc à effectuer l'opération logique suivante :

$$p(t) = \overline{s(t) \oplus p(t-1)} \tag{1}$$

$$p(t) = s(t) \oplus \overline{p(t-1)} \tag{2}$$

avec, \oplus désignant la fonction logique « OU exclusif »

Le récepteur RZ-DPSK, présenté à la **Figure 2**, est constitué d'un détecteur différentiel dont le rôle est de convertir la modulation de phase en une modulation d'intensité au moyen d'un interféromètre Mach-Zehnder (MZI). A ce niveau, pour récupérer la séquence initiale, l'opération inverse au précodage est effectuée. Elle consiste à interférer le signal optique reçu avec lui-même, mais décalé d'un temps-bit. Le signal optique reçu est converti en un signal électrique en utilisant deux photodiodes placées chacune sur les deux ports de sortie (port constructif et port destructif) du MZI. Le signal électrique résultant est alors obtenu en faisant la différence des signaux reçus sur les deux ports de sortie du MZI. La valeur logique « 1 » est attribuée aux composantes positives du signal électrique résultant et la valeur logique « 0 » est attribuée à ses composantes négatives. Ce signal est ensuite filtré, régénéré et envoyé à un détecteur d'erreurs pour estimer le nombre d'erreurs au cours de la transmission et visualiser le diagramme de l'œil correspondant aux données reçues. Ainsi, l'opération logique effectuée lors de la détection différentielle pour récupérer la séquence binaire initiale $s(t)$ est :

$$s(t) = p(t) \oplus \overline{p(t-1)} \tag{3}$$

$$s(t) = \overline{p(t) \oplus p(t-1)} \tag{4}$$

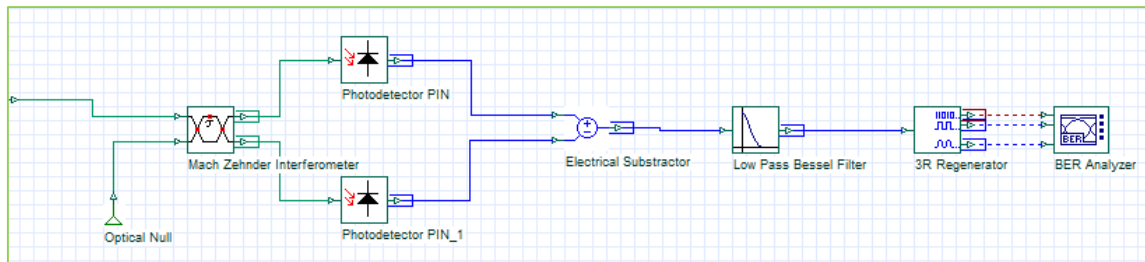


Figure 2 : Schéma du récepteur RZ-DPSK optique

Nous présentons à la **Figure 3** le schéma du système WDM-PON élaboré, afin de simuler nos émetteurs et récepteurs RZ-DPSK optique et évaluer leurs performances en transmission. Nous distinguons principalement (05) cinq différentes parties : l'OLT (Optical Line Termination), le tronçon de transport, le point de distribution, les fibres de distribution et les ONU (Optical Network Unit). La liaison entre l'OLT localisé au central et le point de distribution représenté par le « MUX / DEMUX » utilise une fibre monomode suivie d'une fibre de compensation de dispersion (SMF et DCF) pour le tronçon de transport, puis la liaison entre le point de distribution « MUX / DEMUX » et chaque ONU utilise une fibre de distribution. L'ensemble des fibres utilisées sont bidirectionnelles. En effet, l'OLT regroupe en son sein un ensemble d'émetteurs RZ-DPSK et un ensemble de récepteurs RZ-DPSK. Chaque émetteur génère un signal RZ-DPSK sur une longueur d'onde en respectant un espacement inter-canal bien défini. Ces signaux optiques sont ensuite combinés au niveau du multiplexeur «MUX» pour n'en former qu'un seul signal multiplex, qui est envoyé vers le point de distribution «MUX / DEMUX» via le tronçon de transport. Au niveau de la réception pour l'OLT, le signal optique multiplex montant reçu et provenant du point de distribution est envoyé au démultiplexeur «DEMUX» qui sépare les différentes longueurs d'onde contenues dans le signal, puis les dirige vers les récepteurs RZ-DPSK, chacun étant supposé recevoir une longueur d'onde précise. L'ONU, qui est l'équipement de l'abonné, est constitué d'un bloc d'émission RZ-DPSK et d'un bloc de réception RZ-DPSK. Le bloc d'émission émet sur une longueur d'onde différente de celle reçue au niveau de son bloc de réception.

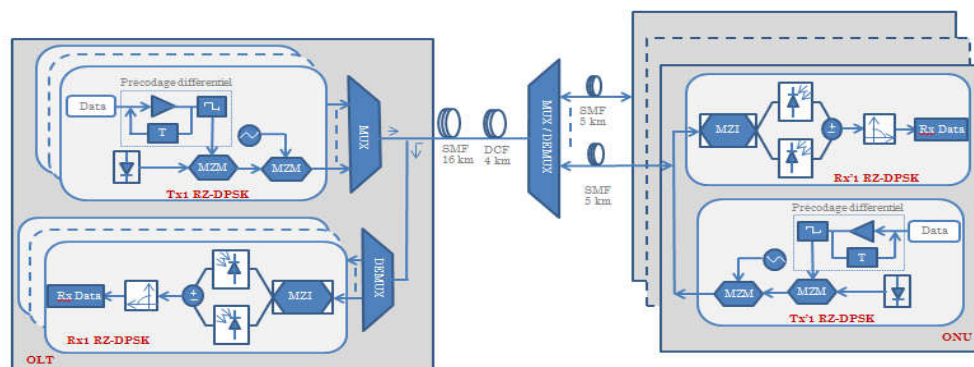


Figure 3 : Synoptique de l'architecture du réseau RZ-DPSK / WDM-PON

2-2. Configurations du système

Dans le but de rendre notre système de transmission plus réaliste, nous utilisons les caractéristiques des composants réels définies dans les datasheets de composants ou normalisées par l'UIT (Union International des Télécommunications), ainsi que celles généralement utilisées par les opérateurs de télécommunications pour configurer les liaisons optiques. Le **Tableau 2** récapitule l'ensemble des paramètres utilisés pour l'émetteur et le récepteur RZ-DPSK, les multiplexeurs et démultiplexeurs, puis les fibres SMF et DCF. Chacun des émetteurs RZ-DPSK de notre système de transmission étant associé à une longueur d'onde précise, nous

avons utilisé 8 canaux WDM de la bande C avec un espacement inter-canal de 100 GHz dont quatre (04) pour le sens descendant (193 THz à 193,3 THz) et quatre (04) pour le sens montant (192,1 THz à 192,4 THz). Le débit binaire par canal est égal à 40 Gb/s avec une trame binaire de taille (2^7-1). Pour la transmission des données au sein de l'environnement de simulation, la puissance optique des lasers au niveau des émetteurs est égale à 0 dBm et 10 dBm respectivement pour les sens descendant et montant. Pour le format RZ-DPSK utilisé pour la modulation des données numériques, le taux d'erreur binaire (BER : Bit Error Rate) est un critère d'évaluation quantitative tandis que le diagramme de l'œil représente un critère qualitatif. D'après la littérature, le BER doit être inférieur ou égal à 10^{-9} pour considérer une transmission est bonne sans recourir à l'utilisation des codes correcteurs d'erreurs pour améliorer les performances du système [9, 13]. En outre, une transmission est d'autant meilleure si le diagramme de l'œil présente une bonne ouverture horizontale que verticale et a une petite gigue [14].

Tableau 2 : Paramètres des composants

Emetteur RZ-DPSK		
<i>Paramètres</i>	<i>Valeurs</i>	
Tension demi-onde V_{π} (V)	4	
Taux d'extinction du MZM N°1 (dB)	20	
Taux d'extinction du MZM N°2 (dB)	50	
Différentiel de tension de commande du MZM N°1 (V)	0	
Différentiel de tension de commande du MZM N°2 (V)	4	
Fréquence de sur-modulation sinusoïdale (Hz)	0,5 * débit	
Amplitude de sur-modulation sinusoïdale	2	
Récepteur RZ-DPSK		
Sensibilité (A/W)	1	
Courant d'obscurité (nA)	10	
Fréquence de coupure (MHz)	0,75 * débit	
Multiplexeurs et démultiplexeurs		
Bande spectrale (THz)	192,1 - 192,4	
	193 - 193,3	
Espacement inter-canal (GHz)	100	
Nombre de canaux	4 up – 4 down	
Largeur de bande à -3dB (GHz)	75	
Pertes d'insertion (dB)	3,5	
Fibres SMF et DCF		
	SMF	DCF
Longueur de la fibre de transport (km)	16	4
Longueur de la fibre de distribution (km)	5	-
Atténuation (dB/km)	0,2	0,5
Dispersion chromatique (ps/nm/km)	17	-80
Pente de dispersion (ps/nm ² /km)	0,056	-0,27
Aire effective (μm^2)	80	22
Coefficient de non-linéarité (m^2/W)	$2,6 \cdot 10^{-20}$	

3. Résultats et discussion

La **Figure 4** présente les courbes du BER en fonction de la puissance optique reçue (POR) pour les longueurs d'onde descendantes en back-to-back (B2B soit à 0 km) et à une distance de 25 km de fibre. L'analyse des résultats montre que pour les valeurs de POR supérieures à -34 dBm, toutes les longueurs d'onde descendantes permettent de garantir un BER inférieur ou égal à 10^{-9} . En B2B, les longueurs d'onde 193 THz et

193,2 THz, puis 193,1 THz et 193,3 THz présentent deux à deux des BER similaires dont les courbes correspondantes sont presque confondues. Avec un BER cible de 10^{-9} , la POR est d'environ -33,3 dBm pour 193 THz et 193,2 THz, puis -32,1 dBm pour 193,1 THz et 193,3 THz. Par contre, à 25 km de fibre et pour un BER égal à 10^{-9} , la POR est d'environ -32,8 dBm, -30,9 dBm, -33,7 dBm, -30 dBm respectivement pour les longueurs d'onde 193 THz, 193,1 THz, 193,2 THz et 193,3 THz. Ceci correspond à des pénalités en puissance respectives de 0,5 dB, 1,2 dB, -0,4 dB et 2,1 dB pour chacune de ces longueurs d'onde. Ces pénalités sont dues aux dégradations que subissent les signaux transportés par chaque canal au cours de leurs propagations dans la fibre. Par ailleurs, à 25 km de fibre et pour les valeurs de POR supérieures à -32 dBm, les plus grandes valeurs du BER sont obtenues pour 193,3 THz, longueur d'onde qui est de ce fait la plus défavorable parmi les longueurs d'onde descendantes.

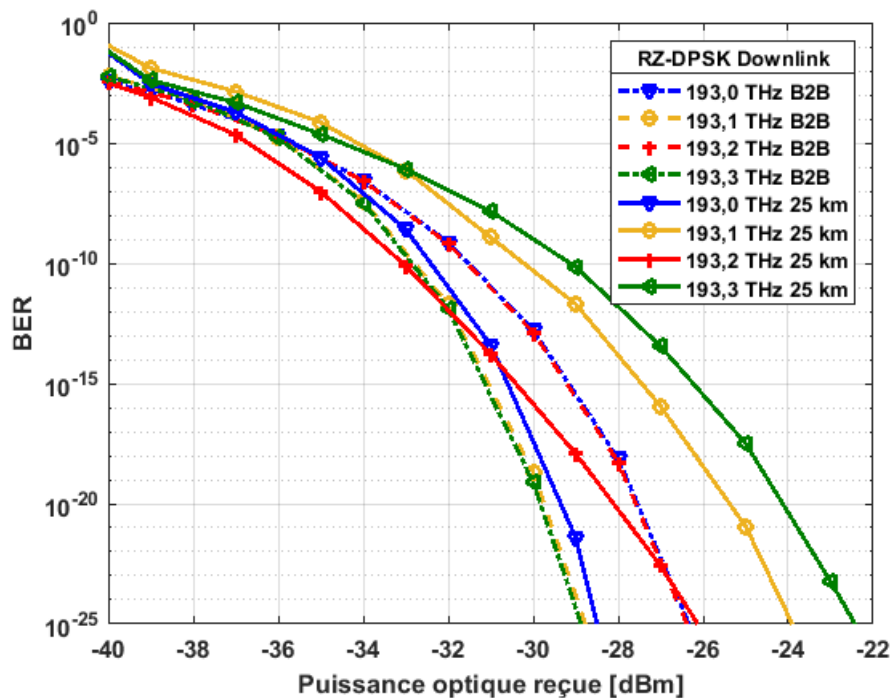


Figure 4 : BER en fonction de la puissance optique reçue en B2B et à 25 km de fibre pour les longueurs d'onde descendantes à un débit de 40 Gb/s par canal au format RZ-DPSK

Pour les longueurs d'onde montantes, la **Figure 5** présente le BER en fonction de la POR en B2B et à 25 km de fibre. Il ressort de l'analyse des courbes qu'un BER cible de 10^{-9} est garanti quelle que soit la longueur d'onde et ce, pour les valeurs de POR supérieures ou égales à -37 dBm. Que ce soit en B2B ou à 25 km de fibre, les allures des courbes du BER sont presque similaires pour les longueurs d'onde 192,1 THz, 192,2 THz et 192,4 THz. En B2B, quelle que soit la valeur de POR considérée, les plus grandes valeurs du BER (dégradation du signal) sont obtenues à la longueur d'onde de 192,3 THz. Il en est de même à 25 km de fibre à partir des valeurs de POR supérieures à -36 dBm. Les performances que présentent ainsi les longueurs d'onde 192,1 THz, 192,2 THz et 192,4 THz sont meilleures que celles de la longueur d'onde 192,3 THz. Ceci se justifie par les interférences inter-canal qui sont d'autant plus pénalisant pour les canaux internes (192,3 THz). Les pénalités en puissance à 25 km de fibre sont d'environ 1,8 dB pour 192,1 THz et 192,3 THz, puis 2,6 dB pour 192,2 THz et 3,3 dB pour 192,4 THz.

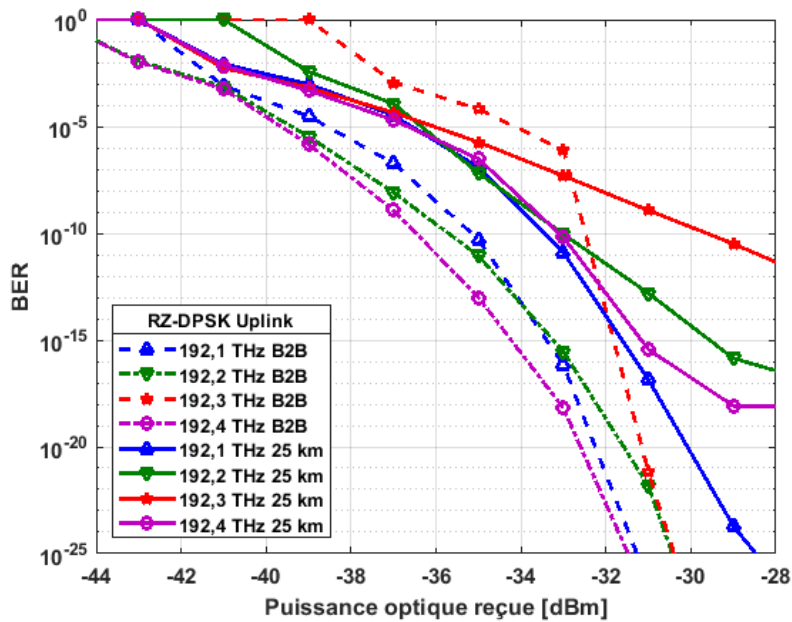


Figure 5 : BER en fonction de la puissance optique reçue en B2B et à 25 km de fibre pour les longueurs d'onde montantes à un débit de 40 Gb/s par canal au format RZ-DPSK

Nous présentons en **Figure 6** les diagrammes de l'œil observés pour l'ensemble des longueurs d'onde du système à une distance de 25 km de fibre. On observe que l'œil est bien plus ouvert pour les longueurs d'onde descendantes que pour les longueurs d'onde montantes. Il paraît donc évident que les phénomènes d'interférences inter-canal couplés avec les effets de dispersion chromatique au sein des fibres, sont plus pénalisants pour les longueurs d'onde montantes comparativement aux longueurs d'onde descendantes. Eu égard à ce qui précède, le format de modulation RZ-DPSK présente de bonnes performances en transmission pour les quatre (04) longueurs d'onde descendantes et les quatre (04) longueurs d'onde montantes utilisées pour le système WDM-PON bidirectionnel proposé. Ce système WDM-PON permet ainsi la transmission d'un débit agrégé de 320 Gb/s sur une distance de 25 km en utilisant des fibres SMF et une fibre de compensation de dispersion chromatique.

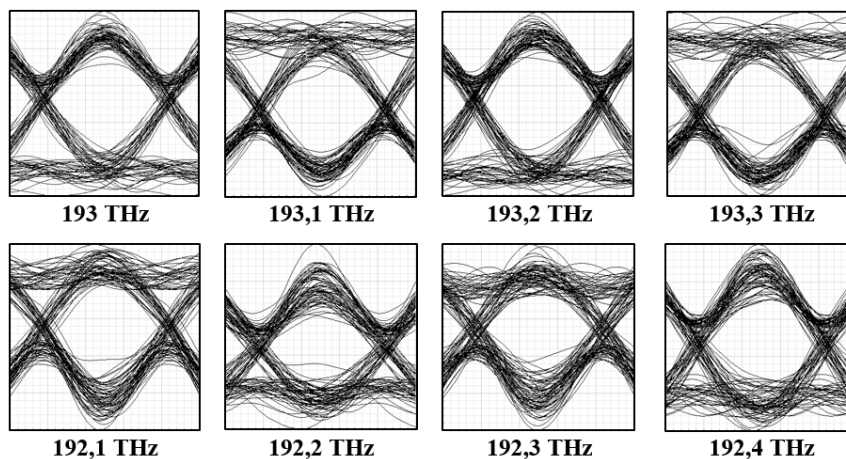


Figure 6 : Diagrammes de l'œil obtenues à 25 km de fibre pour débit de 40 Gb/s au format RZ-DPSK

Dans le but de comparer les performances du format RZ-DPSK à celles du format NRZ-OOK et de valider définitivement nos différents choix techniques, des simulations itératives ont été effectuées. Pour ce faire, nous avons réimplémenté le système de transmission en utilisant le format NRZ-OOK et en ne simulant que le sens descendant. Le débit binaire par canal est maintenu à 40 Gb/s et la puissance optique des lasers est

égale à 0 dBm. La **Figure 7** présente, pour chacun de ces formats, les résultats du taux d'erreur binaire en fonction de la puissance optique reçue pour 193,3 THz (longueur d'onde descendante la plus défavorable) en B2B et à 25 km de fibre.

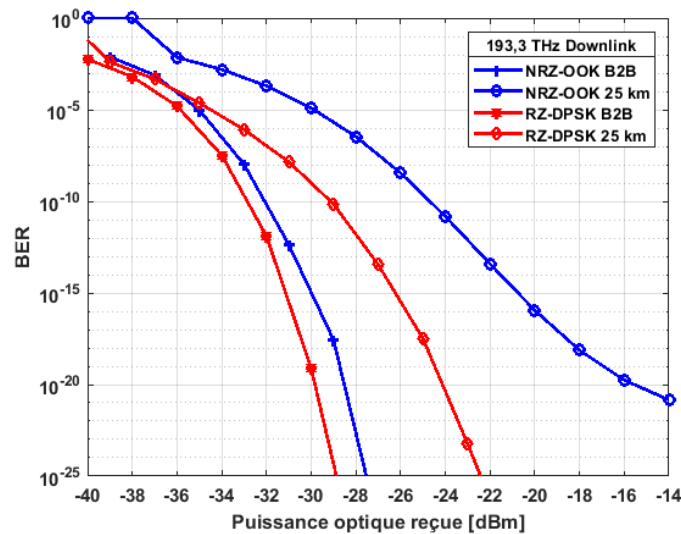


Figure 7 : BER en fonction de la puissance optique reçue en B2B et à 25 km de fibre à un débit de 40 Gb/s par canal au format RZ-DPSK et NRZ-OOK

L'analyse des résultats montre d'une part qu'en B2B et pour une même valeur de POR, les plus grandes valeurs du BER sont obtenues pour le format NRZ-OOK après comparaison avec les valeurs obtenues pour le format RZ-DPSK. Il en est de même à 25 km de fibre en comparant les courbes du BER pour ces deux formats. De ce fait, le format RZ-DPSK présente de meilleures valeurs de BER quelle que soit la POR. D'autre part, pour un BER cible de 10^{-9} , la POR en B2B est d'environ -33,2 dBm pour le RZ-DPSK tandis qu'elle est d'environ -32,5 dBm pour le NRZ-OOK. En outre, à 25 km de fibre, la POR est d'environ -30 dBm pour le RZ-DPSK contre -25,8 dBm pour le NRZ-OOK. Ceci correspond donc à une pénalité en puissance de 0,7 dB en B2B et de 4,2 dB à 25 km de fibre pour le format NRZ-OOK. Par ailleurs, la **Figure 8** présente les diagrammes de l'œil visualisés pour le RZ-DPSK et le NRZ-OOK en B2B et à 25 km de fibre. D'après les différents tracés, on observe que l'ouverture de l'œil est meilleure pour le RZ-DPSK en comparaison à celle observée pour le NRZ-OOK. Par conséquent, le RZ-DPSK présente de meilleures performances en transmission par rapport au NRZ-OOK. Ces résultats restent ainsi conformes aux études réalisées par d'autres auteurs dans [6, 9, 10, 15].

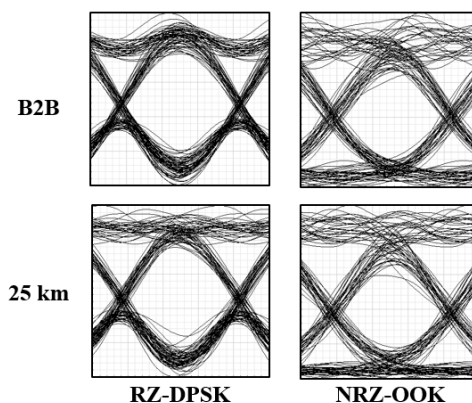


Figure 8 : Diagrammes de l'œil obtenus en B2B et à 25 km de fibre pour débit de 40 Gb/s avec le RZ-DPSK et le NRZ-OOK

La **Figure 9** présente les courbes du BER en fonction du débit pour les formats RZ-DPSK et NRZ-OOK à une distance de 25 km de fibre sur la longueur d'onde de 193,3 THz. Le BER se dégrade (croît) avec une augmentation du débit binaire par canal et ce, plus rapidement pour le NRZ-OOK que pour le RZ-DPSK. Cela se justifie par les phénomènes de dispersion qui augmentent avec le débit et d'autant plus pénalisant pour le format NRZ-OOK. De ce fait, le RZ-DPSK est plus tolérant aux phénomènes de dispersion chromatique que le NRZ-OOK. Toutefois, le NRZ-OOK est plus simple à générer. Il nécessite moins de composants pour son émetteur et son récepteur, ce qui simplifie leur structure et réduit leur coût de déploiement. Ces analyses restent conformes aux travaux effectués dans [6, 15, 16].

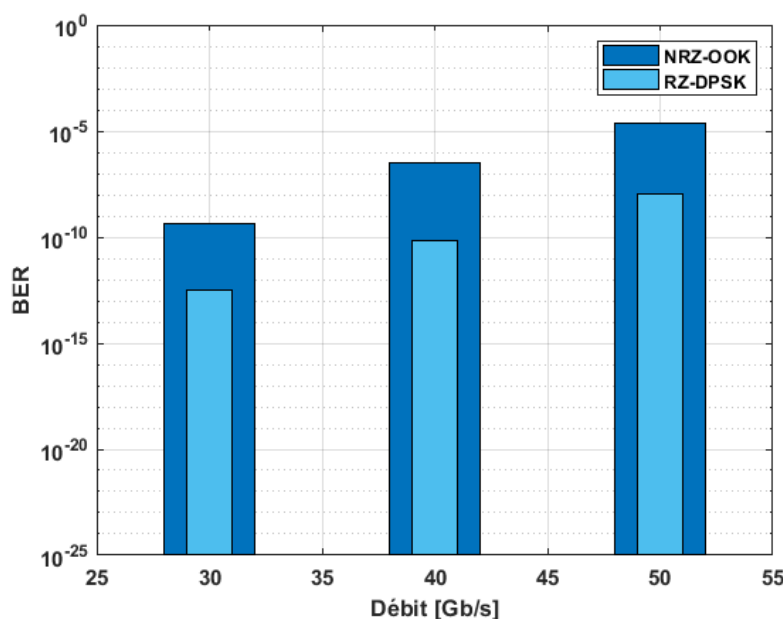


Figure 9 : BER en fonction du débit pour les formats NRZ-OOK et RZ-DPSK à 25 km de fibre

4. Conclusion

Dans ce manuscrit, nous avons démontré la possibilité de transmettre à un débit symétrique de 40 Gb/s par canal en modulant les données au format RZ-DPSK optique dans un système WDM-PON haut débit et ce, sur une distance de 25 km de fibre SMF et de fibre de compensation de dispersion chromatique. Le système de transmission proposé est bidirectionnel avec huit (08) longueurs d'onde simulées dont quatre (04) en sens descendant et quatre (04) en sens montant. De bonnes performances en transmission ont été prouvées pour l'ensemble de ces longueurs d'onde avec un espacement inter-canal de 100 GHz. Toutefois, les longueurs d'onde montantes sont plus affectées par les interférences inter-canal et inter-symbole que les longueurs d'onde descendantes au cours de la transmission dans la fibre. Après une étude comparative des performances du RZ-DPSK et du NRZ-OOK, le format RZ-DPSK se révèle plus tolérant aux phénomènes de dispersion chromatique que le format NRZ-OOK lors de la transmission. Tout en permettant de transmettre à un débit total de 320 Gb/s, le RZ-DPSK pourrait constituer une bonne solution pour la mise à niveau des systèmes de transmission WDM-PON haut débit dans l'accès optique.

Références

- [1] - Z. YE, S. LI, N. CHENG, « Demonstration of High-Performance Cost-Effective 100-Gb/s TWDM-PON Using 4x 25-Gb/s Optical Duobinary Channels with 16-GHz APD and Receiver-Side Post-Equalization », (2015) 3 p.
- [2] - G. SIMON, « Introduction des technologies de multiplexage en longueur d'onde dense dans les futures générations de réseaux d'accès optique », (2016) 200 p.
- [3] - G. SIMON, F. SALIOU, P. CHANCLOU, L. GUILLO, F. BOURGART, « Focus on Time-Dependent Wavelength Drift of DMLs Under Burst-Mode Operation for NG-PON2 », *J. Light. Technol.*, Vol. 34, N° 13 (juill. 2016) 3148 - 3154 p.
- [4] - Q. T. NGUYEN, « Émetteurs achromatiques pour le réseau d'accès optique haut débit multiplexé en longueurs d'onde », (janv. 2011)
- [5] - M. LEFRANÇOIS, « Étude de technologies avancées pour l'optimisation des systèmes de transmission optique multiplexés en longueur d'onde au débit de 40 Gbit/s », (2008) 228 p.
- [6] - F. KHECIB, « Nouvelle Génération de Formats pour les Communications Optiques Mixtes 10 Gbits/s - 40 Gbits/s Basée sur la « PSBT » Optique », (2009) 4 p.
- [7] - J. LATAL, J. VITASEK, P. KOUDELKA, R. POBORIL, A. VANDERKA, « Simulation of modulation formats for optical access network based on WDM-PON », in *2014 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, Graz, Austria, (2014) 1 - 7 p.
- [8] - A. HUSSAIN, C. YU, X. XIN, B. LIU, A. LATIF, Y. KHAN, « A novel duplex WDM-PON with DPSK modulated downstream and re-modulation of the downlink signal for OOK upstream », *Optoelectron. Lett.*, Vol. 8, N° 2 (mars 2012) 134 - 137 p.
- [9] - I. KURBATSKA, A. ALSEVSKA, L. GEGERE, « Comparison of modulation formats for use in the next generation passive optical networks », in *2016 Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS)*, Shanghai, China, (2016) 3783 - 3787 p.
- [10] - A. HUSSAIN, X. XIN, H. ASHIQ, A. MUNIR, M. AFRIDI, *A symmetric 10Gbps/λ colorless WDM-PON*, Vol. 9, (2013)
- [11] - Y. KHAN, X. XIN, A. HUSSAIN, A. LATIF, B. LUI et A. KHAN, « A cost effective architecture for full duplex hybrid WDM/TDM-PON using DPSK downstream and colorless re-modulated upstream OOK data », *Int. J. Adv. Inf. Sci. Serv. Sci.*, Vol. 4, N° 18 (oct. 2012) 9 - 14 p.
- [12] - R. AGALLIU et M. LUCKI, « System improvements in dense wavelength division multiplexing networks by using advanced optical modulation formats », in *2015 17th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, Budapest, (2015) 1 - 4 p.
- [13] - A. HUSSAIN, C. YU, X. XIN, B. LIU, A. LATIF, Y. KHAN, « A novel duplex WDM-PON with DPSK modulated downstream and re-modulation of the downlink signal for OOK upstream », *Optoelectron. Lett.*, Vol. 8, N° 2 (mars 2012) 134 - 137 p.
- [14] - M. F. O. SANYA, « Déploiement de réseaux optiques d'accès NGPON dans des métropoles de pays en développement : proposition de nouvelles techniques d'implémentation de l'OFDM », (2015) 225 p.
- [15] - A. H. GNAUCK et P. J. WINZER, « Optical phase-shift-keyed transmission », *J. Light. Technol.*, Vol. 23, N° 1 (janv. 2005) 115 - 130 p.
- [16] - G. DUCOURNAU, O. LATRY, M. KETATA, « The all-fiber MZI structure for optical DPSK demodulation and optical PSBT encoding », *Open Cybern. Syst. J.*, Vol. 4, (2013) 78 - 89 p.