

ROBUSTESSE DES MODULATIONS QPSK-OFDM A 100 GBPS ET 16QAM-OFDM A 200 GBPS AUX IMPERFECTIONS D'IMPLEMENTATION PRATIQUE ET DE TRANSMISSION

Mengdi Song¹, Erwan Pincemin¹, Didier Grot¹, Thierry Guillosoy¹, Yves Jaouën²,
Raphaël Le Bidan³

¹ Orange Labs Networks, 2 Avenue Pierre Marzin, 22300 Lannion, France

² Institut Télécom, Télécom ParisTech, CNRS UMR 5141, 46 Rue Barrault, 75634 Paris, France

³ Institut Télécom, Télécom Bretagne, CNRS UMR 3192 LAB-STIC, 29238 Brest, France

mengdi.song@orange.com

RÉSUMÉ

Dans ce papier, nous évaluons la sensibilité des modulations QPSK-OFDM à 100 Gbps et 16QAM-OFDM à 200 Gbps aux imperfections d'implémentation expérimentale et de transmission. En dépit de sa plus forte sensibilité, nous démontrons ici que la complexité d'implémentation du format 16QAM-OFDM à 200 Gbps est gérable expérimentalement, en réalisant une transmission sans erreur sur 10x100 km de fibre standard G. 652.

MOTS-CLEFS : *Transmission optique WDM ; OFDM ; QPSK ; 16QAM.*

1. INTRODUCTION

Il a récemment été démontré que la technique OFDM multi-bandes (MB-OFDM: *Multi-Band Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) est une alternative intéressante à la technologie mono-porteuse DP-QPSK (*Dual-Polarization Quaternary Phase Shift Keying*) pour la transmission WDM longue distance à 100 Gbps [1]. Afin d'accroître encore plus l'efficacité spectrale des prochaines générations de systèmes de transmission WDM, les modulations d'amplitude en quadrature d'ordres supérieurs (8QAM, 16QAM, 32QAM, ...) commencent à être évaluées [2]. Pourtant, ces formats sont très sensibles aux imperfections d'implémentation expérimentale, donc plus exigeants sur la qualité de l'émetteur et du récepteur, tout en étant plus vulnérables aux défauts de transmission.

Dans ce papier, nous évaluons la sensibilité des modulations QPSK-OFDM à 100 Gbps et 16QAM-OFDM à 200 Gbps aux imperfections d'implémentation expérimentale, tels que le bruit de phase des lasers, l'ENOB (*Effective Number Of Bits*) limitée des convertisseurs numériques-analogiques ou DAC (*Digital-to-Analogue Converters*), le désaccord de phase entre les composantes en phase (I) et en quadrature (Q) du signal complexe, la non-linéarité de la fonction de transfert du modulateur I/Q ou CMZM (*Complex Mach-Zehnder Modulator*), ainsi qu'à l'accumulation du bruit d'ASE (*Amplified Spontaneous Emission*) dans la chaîne d'amplificateurs optiques ou aux effets non-linéaires dans la ligne de transmission. On montre ici que la complexité d'implémentation du format 16QAM-OFDM à 200 Gbps est tout à fait gérable en pratique, en observant une pénalité de 7,8 dB seulement (au lieu de 7 dB prévus par la théorie) entre les courbes de sensibilité OSNR (*Optical Signal-to-Noise Ratio*) des formats QPSK-OFDM à 100 Gbps et 16QAM-OFDM à 200 Gbps, et en réalisant une transmission WDM sans erreur sur un lien de 10x100 km de fibre standard G. 652 n'utilisant pas de gestion de la dispersion chromatique.

2. IMPACT DES IMPERFECTIONS DE L'EMETTEUR ET DU RECEPTEUR

Les études numériques sont réalisées par co-simulation entre Matlab® et VPI Transmission Maker (VPI-TM). La génération du signal OFDM du côté émetteur et le traitement du signal numérique (DSP) côté récepteur sont réalisées sous Matlab®. VPI-TM est utilisé pour réaliser la conversion électrique-optique via le modulateur IQ, le multiplexage en polarisation, et la détection cohérente en réception, en résumé pour tout le traitement analogique du signal. Le traitement numérique du signal est quant à lui détaillé dans la référence [1]. Notre signal MB-OFDM est constitué de 4 sous-bandes multiplexées en polarisation. Chaque sous-bande porte un débit de 25 Gbps lorsque la modulation utilisée est de type QPSK et de 50 Gbps lorsque la modulation utilisée est de type 16QAM. La largeur spectrale de chaque sous-bande est de 8 GHz. Une bande de garde de 2 GHz est introduite entre sous-bandes voisines. L'occupation spectrale résultante du signal MB-

OFDM est donc de 38 GHz, et il transporte 100 Gbps en QPSK ou 200 Gbps en 16QAM, ce qui donne respectivement une efficacité spectrale de 2.63 bits/s/Hz et de 5.26 bits/s/Hz.

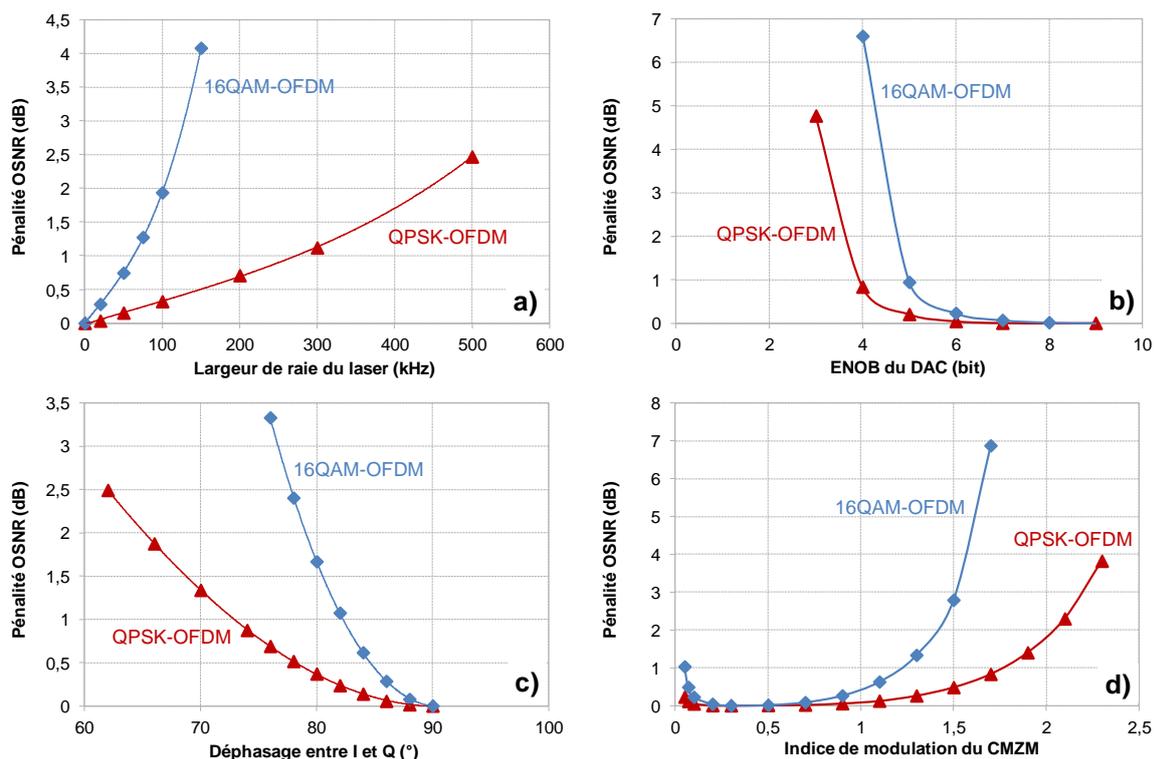


Fig. 1 : Pénalité OSNR obtenue pour un BER= 10^{-3} en fonction de la largeur de la raie laser (a), de l'ENOB des DAC (b), du déphasage I/Q (c) et de l'indice de modulation du modulateur I/Q (d).

Quatre jeux de simulations numériques ont été effectués pour évaluer la sensibilité des deux formats étudiés au bruit de phase des lasers (figure 1.a), à l'ENOB limité des DAC (figure 1.b), au déphasage I/Q de l'émetteur (figure 1.c), ainsi qu'à la non-linéarité de la fonction de transfert du CMZM (figure 1.d). Il est à noter que la même quantité de bruit de phase a été ajoutée sur le laser d'émission et sur l'oscillateur local, et que le déphasage I/Q idéal à l'émission est de 90° . L'indice de modulation du CMZM est défini comme le ratio entre l'amplitude crête-crête du signal OFDM dans le domaine électrique et la tension V_π du modulateur. Les quatre figures ci-dessus montrent toutes une sensibilité exacerbée de la modulation 16QAM-OFDM par rapport au format QPSK-OFDM. Ainsi, le format 16QAM-OFDM admet-il quatre fois moins de bruit de phase que le format QPSK-OFDM, obligeant à réduire la largeur de la raie laser de ~ 300 kHz à ~ 70 kHz pour une pénalité OSNR de 1 dB. De même, 1 bit d'ENOB supplémentaire est requis côté DAC pour maintenir la pénalité OSNR à 1 dB dans le cas du format 16QAM-OFDM. En termes de déphasage I/Q, le désaccord de phase toléré est réduit d'un facteur deux (de $\sim 17^\circ$ à $\sim 8^\circ$) dans le cas de la modulation 16QAM-OFDM. De manière identique, la pénalité OSNR de 1 dB est atteinte pour une tension crête-crête du signal électrique de seulement $\sim 1,25 V_\pi$ en 16QAM-OFDM alors qu'elle est de $\sim 1,75 V_\pi$ en QPSK-OFDM.

3. PERFORMANCE EN TRANSMISSION SUR UNE LIGNE DE 10X100 KM DE FIBRE G.652

Afin d'évaluer non seulement l'impact des limitations de l'émetteur/récepteur mais aussi l'effet des imperfections de la ligne de transmission (bruit d'ASE et non-linéarités accumulés le long de la ligne), un émetteur/récepteur MB-OFDM cohérent, dont les sous-porteuses sont modulées soit en QPSK soit en 16QAM, est construit expérimentalement. Les détails sur le dimensionnement du signal OFDM sont décrits dans la référence [1]. Deux générateurs de signaux arbitraires embarquant chacun quatre DAC et quatre lasers à cavité externe à faible bruit de phase espacés de 10 GHz sont utilisés pour générer les quatre sous-bandes OFDM décalées [1]. Les composantes en phase et en quadrature de ces dernières sont amplifiées au moyen de drivers RF linéaires (SHF-807), qui nourrissent quatre modulateurs I/Q (Fujitsu FTM-7962-EP) opérant dans la partie linéaire de leur fonction de transfert. Un module de multiplexage de polarisation crée un signal MB-OFDM à double polarisation avec un symbole de décalage entre les polarisations X et Y. Le signal MB-OFDM à 100

Gbps ou 200 Gbps ainsi généré à 1552,52 nm est ensuite combiné avec 59 autres canaux WDM à 100 Gbps espacés de 50 GHz utilisant la modulation mono-porteuse DP-QPSK. La ligne de transmission de 1000 km sans gestion de dispersion est constituée de dix tronçons de 100 km de fibre G.652, dont les pertes sont compensées par des EDFA (*Erbium-Doped Fibre Amplifier*) simple-étage de 20-dB de gain et de 4.5-dB de facteur de bruit. Au milieu de la ligne, un égaliseur de gain dynamique égalise la puissance des canaux WDM afin d'obtenir un spectre plat en fin de liaison. Au niveau du récepteur, le signal est demodulé au moyen d'un détecteur cohérent à diversité de phase et de polarisation. L'oscillateur local est un laser à cavité externe à faible bruit de phase.

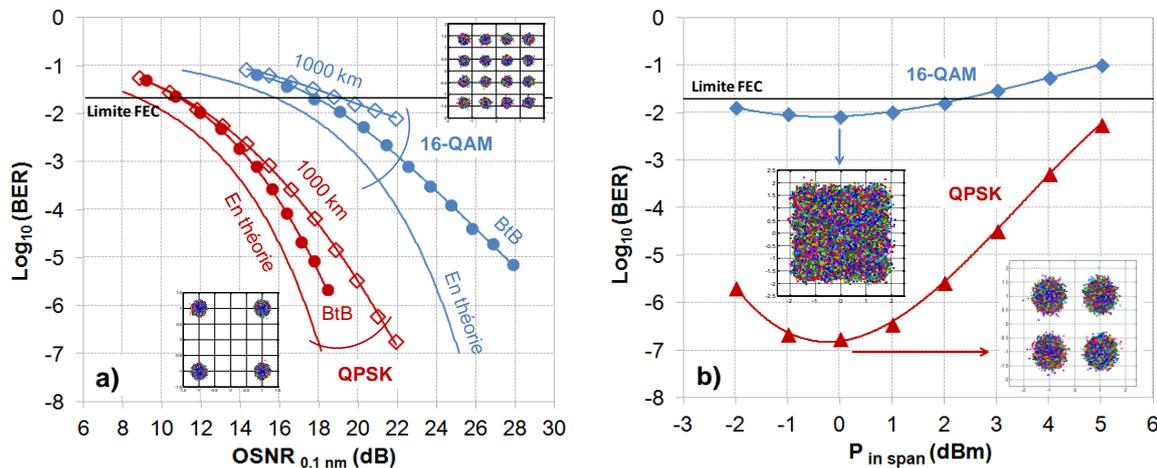


Fig. 2 : Courbes de sensibilité BER vs. OSNR obtenues en BtB et après 1000 km de transmission pour $P_{\text{IN SPAN}} = 0 \text{ dBm}$, avec en complément les références théoriques et les constellations mesurées en BtB (a). BER vs. $P_{\text{IN SPAN}}$ après 1000 km de transmission avec en complément les constellations mesurées après 1000 km (b).

Le montage expérimental est d'abord validé en BtB (*Back-to-Back*). Les courbes de sensibilité en taux d'erreur ou BER (*Bit-Error Rate*) en fonction de l'OSNR (mesuré dans 0.1 nm) théoriques et expérimentales sont tracées sur la figure 2.a. Pour un $\text{BER} = 10^{-3}$, le décalage entre les courbes BtB théoriques des formats QPSK-OFDM et 16QAM-OFDM est égal à 7 dB, alors qu'après la mise en œuvre expérimentale 7,8 dB de pénalités OSNR seulement sont mesurés. On peut en déduire que le coût de l'implémentation expérimentale est de seulement 0,8 dB, ce qui à notre connaissance est l'une des performances les meilleures jamais rapporté à ce débit de 200 Gbps en 16QAM. La performance en transmission est alors rapportée dans la figure 2.b, où sont tracées les courbes de BER après 1000 km en fonction de la puissance injectée dans les "spans" de fibre ($P_{\text{IN SPAN}}$). Les deux formats étudiés montrent tous deux une transmission sans erreur après 1000 km, puisque le BER obtenu à la puissance optimale injectée dans les "spans" est inférieur au seuil de décrochement (fixé ici à 2×10^{-2}) du code correcteur d'erreur à décision douce. Néanmoins et comme attendu, le format 16QAM-OFDM à 200 Gbps ($\text{BER} \sim 1 \times 10^{-2}$ pour $P_{\text{IN SPAN}} = 0 \text{ dBm}$) est significativement moins bon que le format QPSK-OFDM à 100 Gbps ($\text{BER} \sim 1 \times 10^{-7}$ pour $P_{\text{IN SPAN}} = 0 \text{ dBm}$). Ceci est corroboré par les courbes de sensibilité BER versus OSNR obtenues après transmission.

4. CONCLUSION

Dans ce papier, nous avons évalué la robustesse des modulations QPSK-OFDM à 100 Gbps et 16QAM-OFDM à 200 Gbps à diverses imperfections d'implémentation pratique. La plus grande sensibilité du format 16QAM-OFDM par rapport au format QPSK-OFDM a été démontrée. Heureusement, en dépit de cette plus grande complexité de réalisation, nous avons réussi à construire un émetteur/récepteur 16QAM-OFDM à 200 Gbps dont le coût d'implémentation pratique est de 0,8 dB seulement en termes de pénalité OSNR. Parallèlement, une transmission sans erreur sur 10x100 km de fibre G.652 a été réalisée avec ce format, même si les marges "système" sont nettement dégradées par rapport à notre format de référence QPSK-OFDM à 100 Gbps.

Ce travail a été en partie financé par les projets "CELTIC SASER" et "FP7-Call 8 FOX-C".

- [1] E. Pincemin, M. Song et al., "Multi-band OFDM Transmission at 100 Gbps with Sub-band Optical Switching", *IEEE J. Lightwave Technol.*, Vol. 32, No. 12, pp. 2202-2219, 2014.
- [2] M.F. Huang et al., "EDFA-Only WDM 4200-km Transmission of OFDM-16QAM and 32QAM", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 24, No. 17, pp. 1466-1468, 2012.