

Etude expérimentale d'application de D-EM à des transmissions haut débit

(figure 4.28(B)). Même constat d'amélioration de performances à 25 Gb/s (figure 4.28(C)) : 30 km atteints avec un BER de $5 \cdot 10^{-7}$ et 20 km avec un BER inférieur à 10^{-4} .

A 40 Gb/s, après 4 km de propagation, le D-EML entraîne une réduction de pénalité de 1 dB par rapport à la modulation simple pour un BER de 10^{-9} (figure 4.28(D)). La modulation duale permet ainsi d'atteindre 8 km avec un BER inférieur à 10^{-9} alors qu'un plancher d'erreurs pour la modulation simple apparaît déjà à $5 \cdot 10^{-2}$. Par ailleurs, les simulations suggèrent qu'il y a une possibilité d'atteindre 12 km en utilisant un FEC.

Cette partie présente les résultats expérimentaux de mesures de transmission qui permettent d'évaluer les performances de la modulation duale à haut débit et de confirmer les résultats de simulation montrés précédemment. Ces expériences ont été effectuées sur la plateforme DESCARTES du Laboratoire de photonique et de nanostructures (LPN) du CNRS.

4.2.3.a. Le montage expérimental

Le montage expérimental pour la mesure du BER à 20 Gb/s, 25 Gb/s et 40 Gb/s est montré dans la figure 4.29.

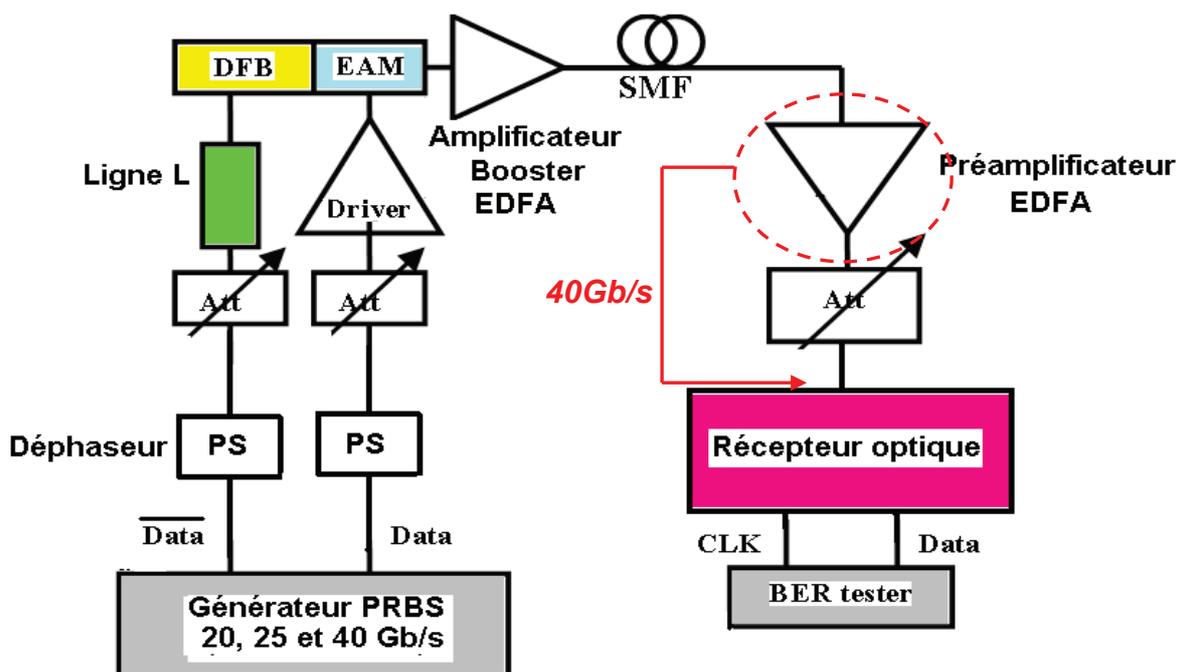


Figure 4.29: Dispositif expérimental pour la mesure du BER à 20, 25 et 40 Gb/s

Un générateur de séquences pseudo-aléatoires PRBS (Pseudo Random Bit Sequence) fournit le signal modulant le laser DFB et le modulateur EAM, avec les données inversées et non inversées respectivement, à 20 Gb/s, 25 Gb/s et 40 Gb/s. Deux déphaseurs (PS : Phase Shifter) sont utilisés pour ajuster le retard temporel entre les signaux d'attaque du laser et du modulateur dans le but de minimiser l'effet du chirp transitoire du D-EML. Deux atténuateurs RF permettent de varier l'amplitude des signaux modulateurs. Une ligne électrique de longueur l compense la différence de temps de propagation entre les données inversées et non inversées. Un amplificateur optique booster (EDFA) est placé à l'entrée de la ligne de transmission afin de conserver une valeur constante de la puissance optique moyenne dans la fibre optique ; il peut être éventuellement ôté pour les expériences à 40 Gb/s. Un préamplificateur optique est placé devant ou derrière un atténuateur optique variable dont le rôle est de varier la puissance optique ou bien le SNR reçu par la photodiode. Ainsi, le préamplificateur optique sera placé juste avant la photodiode pour les expériences de mesures à 40Gb/s pour obtenir des résultats de performances en fonction du SNR.

4.2.3.b. *Transmission à 20 Gb/s*

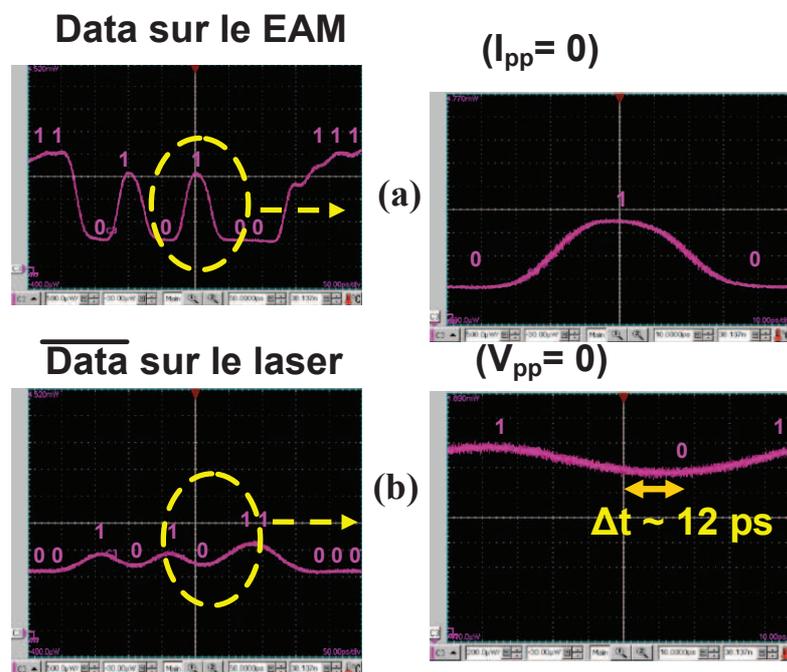


Figure 4.30: Mesure du retard temporel entre la modulation AM du modulateur et FM du laser,
 (a) modulateur modulé seul, (b) laser modulé seul

La température du D-EML est contrôlée à 20 °C et la puissance en entrée de la fibre est de l'ordre de 4 dBm. Le courant de polarisation du laser (I_{laser}) est de 80 mA et le courant de modulation (I_{pp}) vaut 10 mA_{pp} pour tendre vers une excursion en fréquence correspondante aux conditions de *Binder* et *Kohn*. La tension de polarisation de l'EAM (V_{mod}) de -3.2 V permet de bénéficier du chirp négatif du modulateur. La tension de modulation (V_{pp}) est de 2V_{pp}.

Le décalage temporel entre la modulation AM du modulateur et FM du laser est estimé à 12 ps. La mesure de ce délai est obtenue à l'aide d'un oscilloscope par visualisation de la modulation obtenue par modulateur seul (figure 4.30(a)) puis par le laser seul (figure 4.30(b)).

La figure 4.31 montre qu'après 39,7 km, alors que le BER est limité à environ 10^{-4} dans le cas de la modulation simple, la modulation duale permet un BER à moins de 10^{-9} . Elle présente aussi un gain de près de 4 dB sur la sensibilité du récepteur par rapport à la modulation simple pour un BER de 10^{-4} sur une séquence PRBS de 2^7-1 . Les diagrammes de l'œil observés dans le cas d'une modulation simple de l'EAM, puis d'une modulation duale sont présentés après propagation sur la distance de 39,7 km ainsi qu'en BtoB dans la figure 4.32. Le diagramme de l'œil relatif à la modulation simple (figure 4.32(b)) montre clairement un dédoublement de niveau par rapport au cas BtoB (figure 4.32(a)). Ceci peut s'expliquer par un étalement temporel des impulsions transmises induit par la dispersion de la fibre.

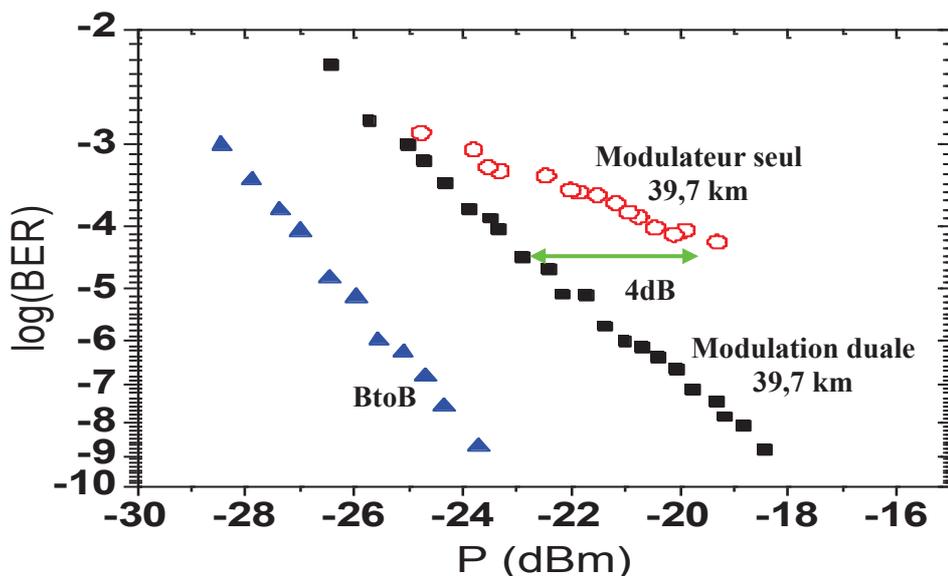


Figure 4.31: Amélioration de la qualité de transmission induite par la modulation duale à 20 Gb/s mesurée sur la sensibilité du photorécepteur en BtoB et à 39,7 km, $I_{laser} = 80$ mA, $I_{pp} = 10$ mA_{pp}, $V_{mod} = -3,2$ V, $V_{pp} = 2$ V_{pp}

Dans le cas de la modulation simultanée d'amplitude et de fréquence, en s'approchant de la condition de *Binder* et *Kohn*, le D-EML commence à être efficace contre les effets de dispersion grâce à un contrôle adéquat de la distorsion des impulsions. En conséquence, l'œil est plus ouvert (figure 4.32(c)).

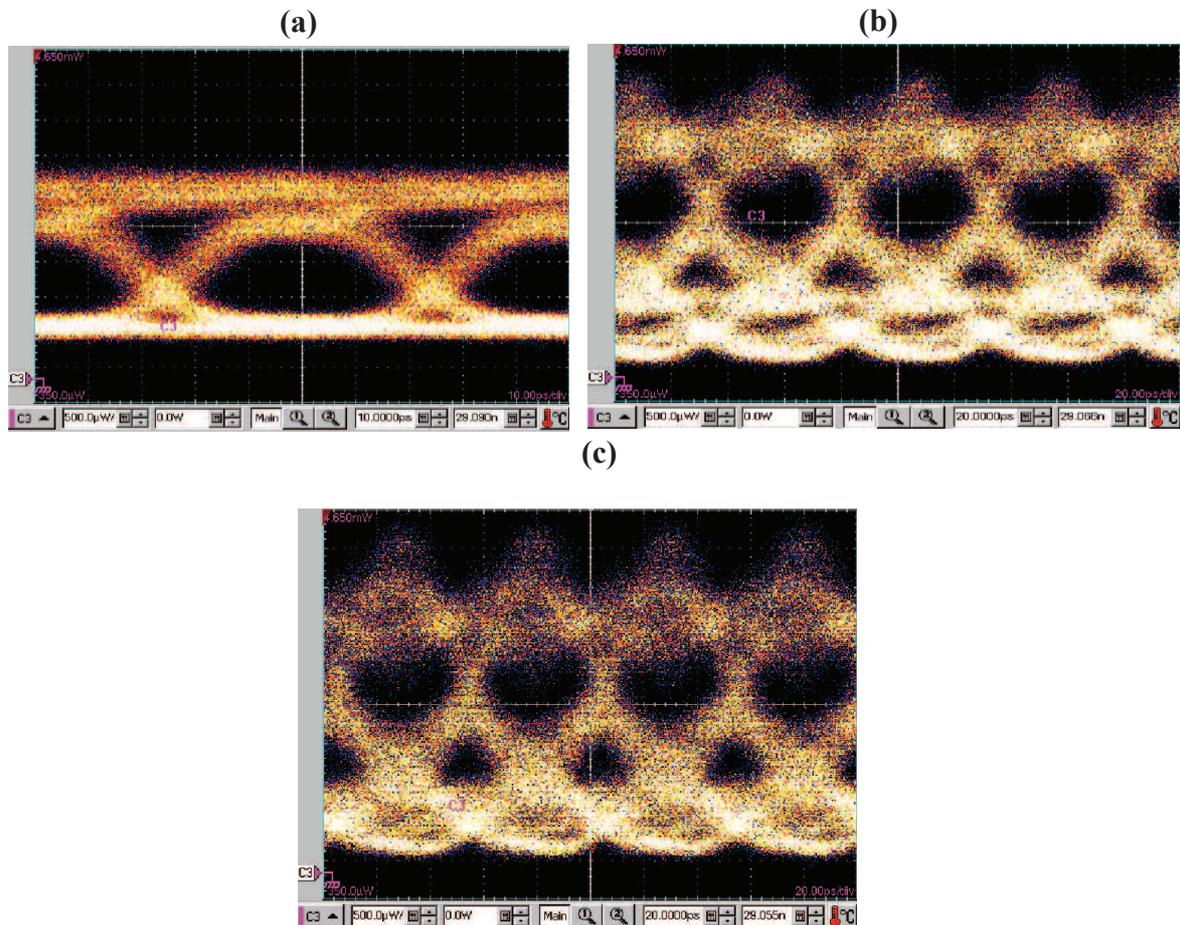


Figure 4.32: Effet de la modulation duale sur le diagramme de l'œil à 20 Gb/s : en BtoB (a) et après 39,7 km pour une modulation simple de l'EAM (b) et une modulation duale du D-EML (c)

4.2.3.c. Transmission à 25 Gb/s

Par rapport au cas à 20 Gb/s, le courant I_{laser} est abaissé à 75 mA afin d'augmenter le chirp adiabatique, tout en gardant le même courant de modulation tendant vers la condition de *Binder* et *Kohn*. La tension V_{mod} est élevée à -3,03 V pour accentuer l'excursion en modulation et réduire l'absorption. La modulation V_{pp} reste à $2V_{pp}$. La figure 4.33 montre que la transmission d'une séquence courte PRBS de 2^7-1 en modulation duale à 24 km est limitée à un BER de 5.10^{-8} . Cependant, la qualité de transmission peut être encore améliorée en réduisant le courant I_{laser} à 70 mA pour atteindre un BER de 5.10^{-10} pour une puissance reçue de l'ordre de -10 dBm. Ceci peut s'expliquer par l'augmentation du chirp adiabatique permettant de mieux approcher de la condition de *Binder* et *Kohn*.

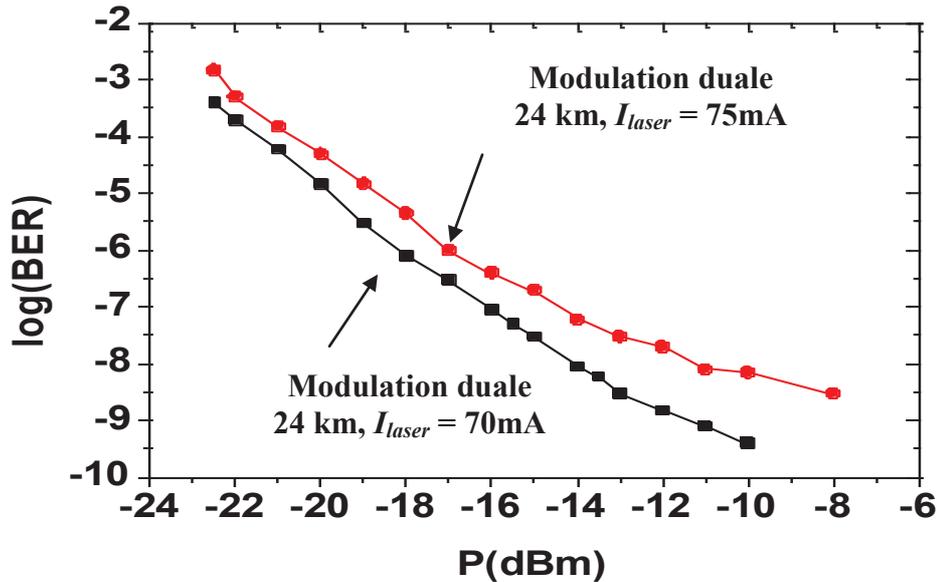


Figure 4.33: Effet de la réduction du courant du laser à 25 Gb/s : BER mesuré en fonction de la puissance optique reçue par la photodiode après 24 km, $I_{pp} = 10 \text{ mA}_{pp}$, $V_{mod} = -3,03\text{V}$, $V_{pp} = 2V_{pp}$

4.2.3.d. Transmission à 40 Gb/s

i. Analyse de la transmission à 7 km

La température est contrôlée à 25 °C et la puissance moyenne à la sortie du D-EML est de l'ordre de -12 dBm. La figure 4.34 présente les résultats de mesures de qualité de transmission obtenus à 7 km pour deux tensions V_{mod} différentes et une même modulation $V_{pp} = 2V_{pp}$. Le courant I_{laser} est abaissé à 40 mA afin d'augmenter encore le chirp adiabatique par rapport aux cas à 20 Gb/s et 25 Gb/s et en conservant le même courant $I_{pp} = 10 \text{ mA}_{pp}$ pour tendre au respect de la condition de *Binder et Kohn*. Ainsi, l'effet du pré-chirping induit par la modulation duale est clairement observé pour les deux valeurs de V_{mod} par rapport à la modulation simple : la forte contribution de la modulation simultanée en amplitude et en fréquence du D-EML (condition de *Binder et Kohn*) à combattre la dispersion de la fibre est caractérisée par une amélioration de 7dB et de 4 dB des performances de transmission pour un BER de $5 \cdot 10^{-6}$ respectivement pour $V_{mod} = -3,1\text{V}$ (figure 4.34(a)) et $V_{mod} = -3,3\text{V}$ (figure 4.34(b)).

Dans le premier cas (figure 4.34(a)), la modulation duale permet un BER inférieur à 10^{-9} tandis que la modulation simple présente un plancher d'erreurs à $5 \cdot 10^{-6}$ à cause d'une limite ultime en dispersion. Cependant, la modulation duale présente 2 dB de pénalité par rapport au cas BtoB à cause du signe de chirp du modulateur EAM.

Dans le deuxième cas (figure 4.34(b)) avec une tension de polarisation négative plus forte, une amélioration de 2,5 dB des performances de transmission est atteinte avec la

modulation duale par rapport au cas BtoB à un BER de 10^{-9} . On peut l'attribuer à un effet plus accentué du pré-chirping lié au chirp négatif du modulateur EAM. Le même effet est obtenu pour le cas de la modulation simple qui présente une réduction de pénalité de près de 3 dB par rapport au cas BtoB pour un BER de 10^{-6} . Pour référence, un modulateur Mach-Zehnder (*LiNbO3*) accordé à la même longueur d'onde d'émission du D-EML et caractérisé par un chirp quasi-nul, conduit à des performances similaires avec même plancher d'erreurs pour un BER inférieur à 10^{-9} (figure 4.34(b)).

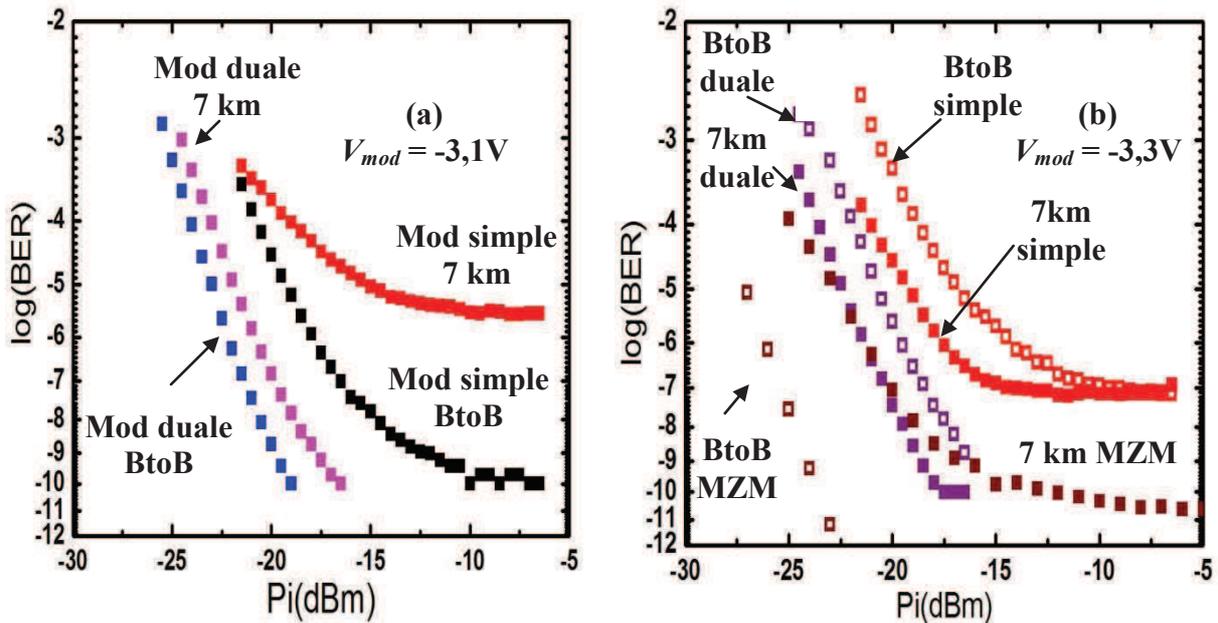


Figure 4.34: Incidence de la tension de polarisation V_{mod} (effet de pré-chirping) : BER mesuré en fonction de la puissance optique reçue par la photodiode après 7 km à 40 Gb/s, $I_{laser} = 40$ mA, $I_{pp} = 10$ mA_{pp}, $V_{pp} = 2$ V_{pp}, $V_{mod} = -3,1V$ (a), $V_{mod} = -3,3V$ (b), les carreaux vides sont pour le cas BtoB et les carreaux pleins après la transmission

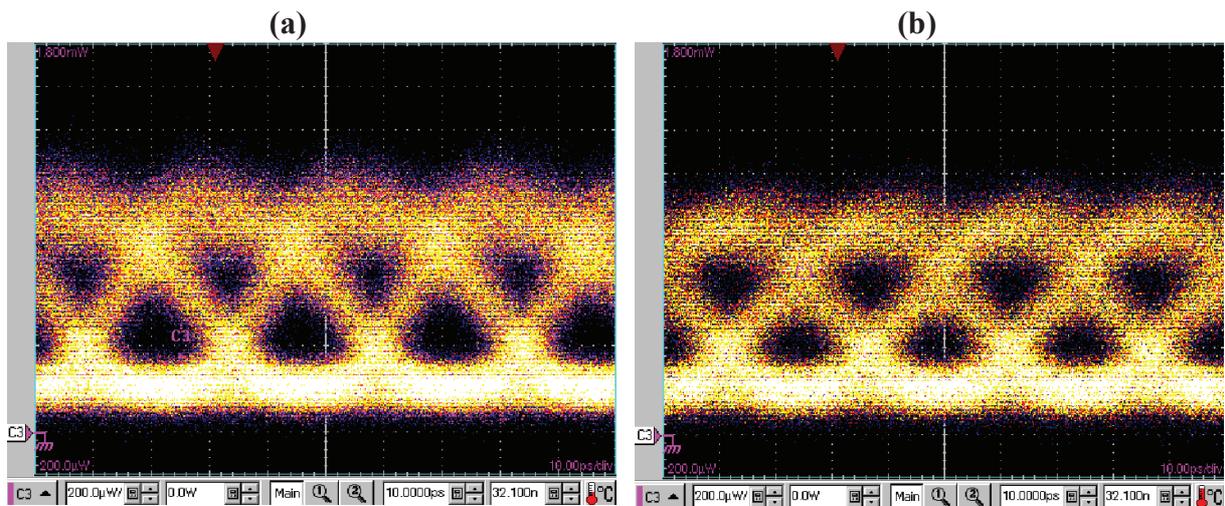


Figure 4.35: Effet de la modulation duale sur le diagramme de l'œil à 40 Gb/s en BtoB (a) et après 7 km (b)

Les diagrammes de l'œil relatifs à la modulation duale à 40 Gb/s en BtoB et après 7 km de propagation sont présentés dans la figure 4.35. Nous remarquons dans la figure 4.35(b) une disparition nette du dédoublement de niveau par rapport à celui observé à 20 Gb/s. Ceci est dû au fait qu'à 40 Gb/s, le budget de liaison permet de réduire l'indice de modulation et donc de mieux s'approcher de la condition de *Binder* et *Kohn*, pour contrôler les déformations temporelles induites par la dispersion sur les impulsions transmises.

ii. Analyse de la transmission en fonction de la distance, à paramètres constants

Les figures 4.36(a) et 4.36(b) paramétrées en distance de transmission, présentent le BER en fonction de la puissance reçue respectivement en modulation simple et duale pour un même point de fonctionnement du D-EML à 40 Gb/s choisi pour une distance de 7 km ($I_{laser} = 40$ mA, $I_{pp} = 10$ mA_{pp}, $V_{mod} = -3,3$ V, $V_{pp} = 2$ V_{pp}). Le fait d'augmenter la distance de transmission au-delà de 7 km sans optimisation du point de fonctionnement du D-EML entraîne à 9 km l'apparition d'un plancher d'erreurs à 5.10^{-6} pour la modulation simple (figure 4.36(a)) et à 10^{-8} pour la modulation duale (figure 4.36(b)). L'impact négatif de la dispersion de la fibre sur les performances de transmission se traduit par l'augmentation du plancher d'erreurs jusqu'à atteindre 10^{-3} et 5.10^{-4} après 11 km de fibre standard respectivement pour les modulations simple et duale.

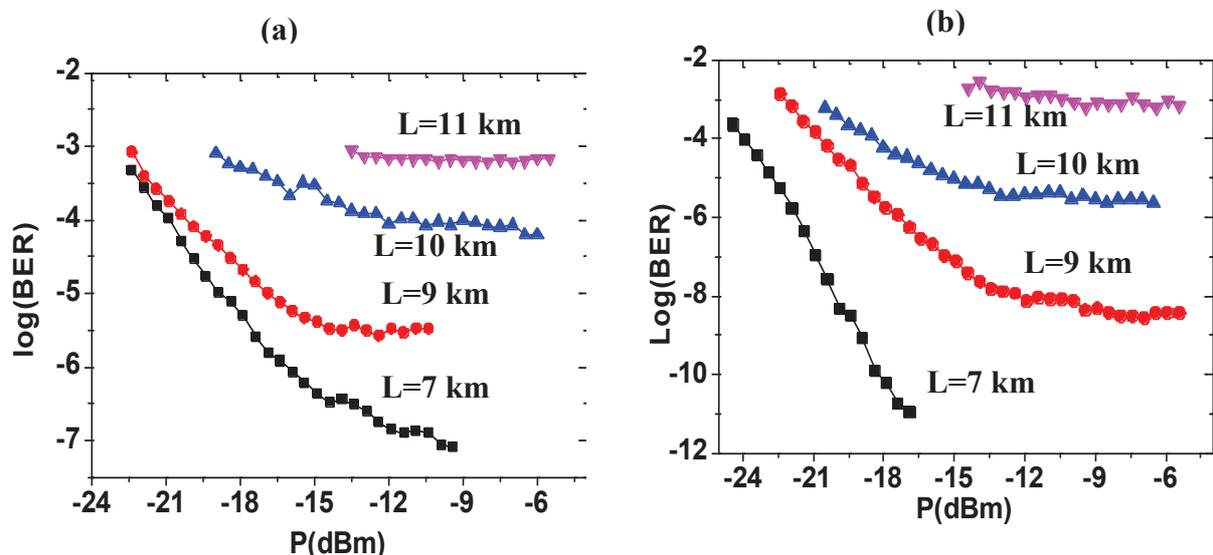


Figure 4.36: Effet de l'augmentation de portée à paramètres constants de sources : BER mesuré en fonction de la puissance optique reçue par la photodiode pour plusieurs distances de transmission à 40 Gb/s, $I_{laser} = 40$ mA, $I_{pp} = 10$ mA_{pp}, $V_{pp} = 2$ V_{pp}, $V_{mod} = -3,3$ V pour le cas d'une modulation simple (a) et duale (b).

L'efficacité de la modulation duale en termes d'augmentation de la portée par rapport à la modulation simple ou celle du Mach-Zehnder (MZM) est caractérisée à une portée donnée, par l'abaissement des valeurs des planchers d'erreurs. Ainsi, pour un BER de 10^{-6} , la modulation duale permet d'atteindre une portée de transmission de 10 km sur fibre monomode standard sans compensation de dispersion tandis que celle par modulation simple de l'EAM ou du MZM est limitée à 8 km et 9 km respectivement (figure 4.37).

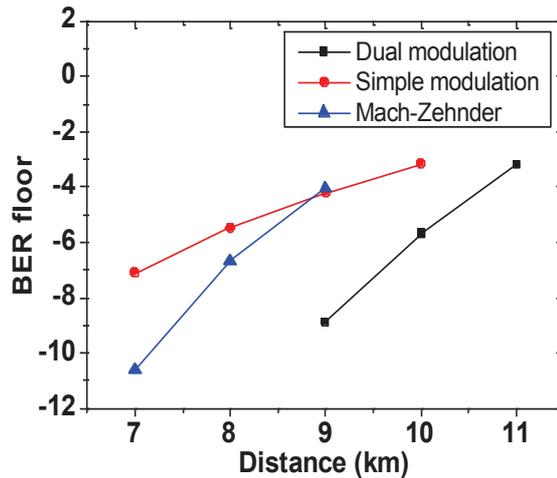


Figure 4.37: Comparaison des performances de différentes sources de modulation (EAM et D-EML) pour un point de fonctionnement fixe ($I_{laser} = 40 \text{ mA}$, $I_{pp}=10 \text{ mA}_{pp}$, $V_{pp} = 2V_{pp}$, $V_{mod} = -3,3V$) : Le plancher d'erreurs mesuré en fonction de la distance incluant les résultats du Mach-Zehnder comme référence ($\lambda_{MZM} = 1534 \text{ nm}$)

iii. Transmission à 10 km et 12 km

Dans le but d'améliorer encore la portée de transmission au-delà de 7 km, le point de fonctionnement du D-EML est modifié. En concordance avec les résultats de simulation qui montrent une extension de portée lorsque le taux d'extinction est réduit (faible indice de modulation d'intensité), V_{pp} est diminuée à $1V_{pp}$. Cela conduit simultanément à devoir réduire I_{pp} à 3 mA_{pp} afin de conserver une condition proche de *Binder et Kohn*. Par ailleurs, la tension de polarisation est fixée à $-3,4 \text{ V}$ pour bénéficier de manière plus significative du chirp négatif du modulateur EAM. Les résultats pour une séquence longue PRBS de $2^{31}-1$ sont présentés dans la figure 4.38.

La modulation duale permet alors d'atteindre 10 km avec un BER de $4 \cdot 10^{-9}$ et 12 km avec un BER de $3 \cdot 10^{-3}$ compatible avec l'utilisation d'un FEC, y compris sans l'adjonction d'un amplificateur optique à l'émission.

A 40 Gb/s, la modulation duale permet ainsi une augmentation de la portée de transmission de 30 % par rapport au MZM. Cette amélioration des performances peut trouver sa justification dans la comparaison des spectres des signaux modulés à la sortie du MZM (figure 4.39(a)) et du D-EML (figure 4.39(b)). L'optimisation du point de fonctionnement du D-EML permet, comme c'est attendu, de réduire la largeur du spectre du signal transmis par rapport au spectre du signal AM relatif au MZM et conduit à l'extension de la portée.

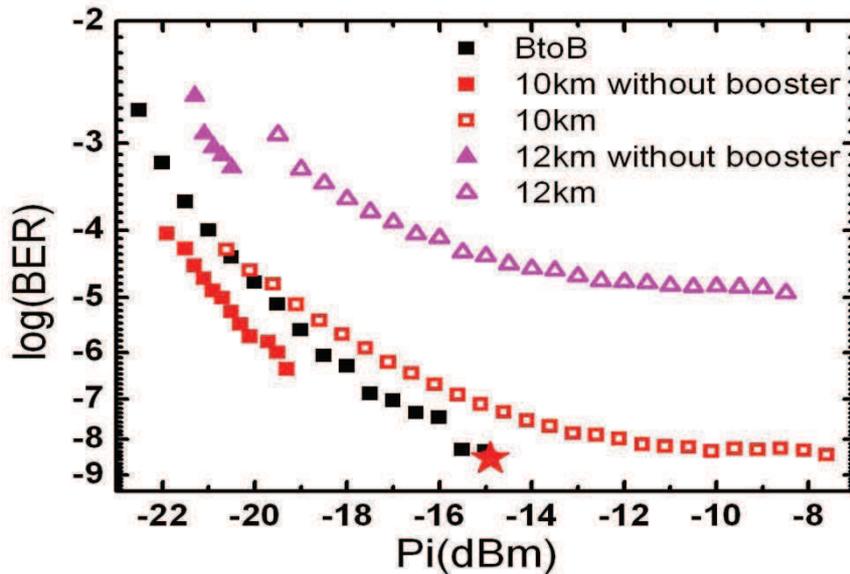


Figure 4.38: BER mesuré en fonction de la puissance optique reçue par la photodiode après 10 et 12 km de fibre SMF à 40 Gb/s, $I_{laser} = 40 \text{ mA}$, $I_{pp} = 3 \text{ mA}_{pp}$, $V_{pp} = 1 \text{ V}_{pp}$, $V_{mod} = -3,4 \text{ V}$

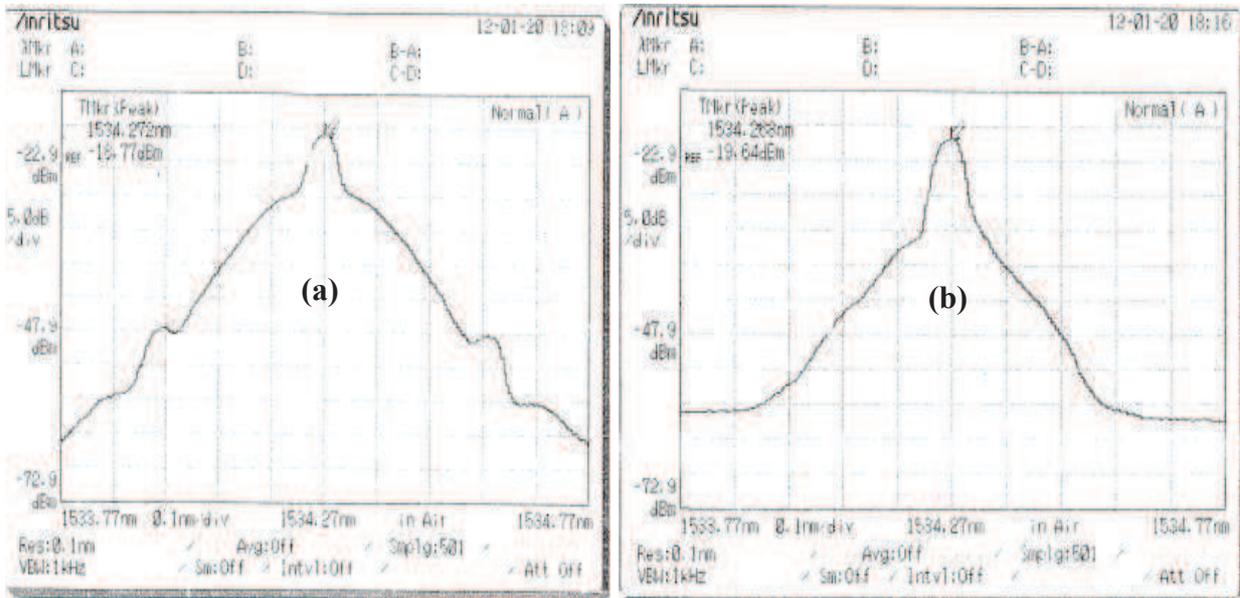


Figure 4.39: Spectre du signal modulé en NRZ observé à la sortie du MZM (a) et du D-EML (b), $I_{laser} = 40 \text{ mA}$, $I_{pp} = 3 \text{ mA}_{pp}$, $V_{pp} = 1 \text{ V}_{pp}$, $V_{mod} = -3.4 \text{ V}$

iv. Mise en perspective des performances de la modulation duale à 40 Gb/s

La figure 4.40 présente une comparaison entre les performances obtenues par la modulation duale et celle du MZM. La modulation duale permet une extension de la portée de plus de 30% par rapport au MZM. Ce résultat montre la grande efficacité de l'exploitation du chirp par la modulation duale par rapport au cas du MZM où le chirp est quasiment nul.

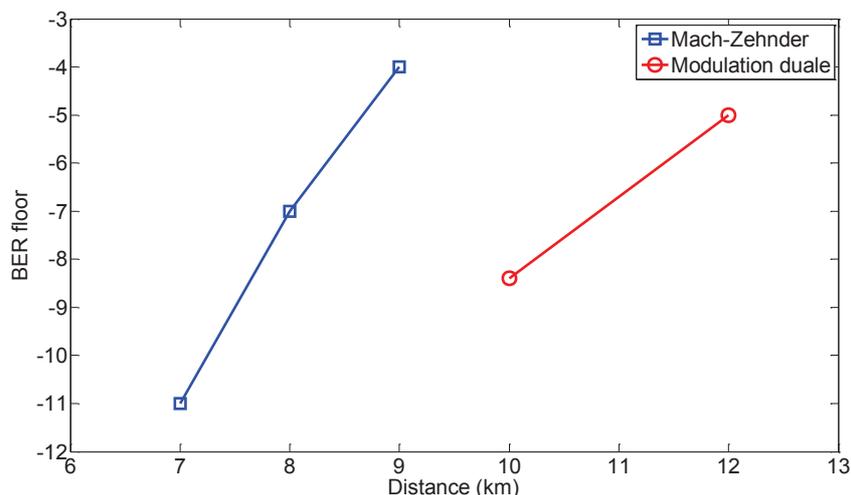


Figure 4.40: Comparaison des performances de différentes sources de modulation : MZM ($\lambda_{MZM} = 1534 \text{ nm}$) et D-EML à 40 Gb/s

Le tableau 5 montre que par rapport à la modulation simple de l'EAM, la modulation duale permet l'amélioration de la portée de plus de 60 %. Ce pourcentage croît en diminuant le débit pour atteindre 100 % à 10 Gb/s.

Les résultats expérimentaux sont en accord avec ceux de la simulation logicielle délivrés par *Xlim*. Ils montrent la compatibilité et l'adaptabilité du D-EML aux hauts débits. La mesure de la bande passante AM de la section laser ne permettait pas d'anticiper cette amélioration de performances à 40 Gb/s. Cependant, un fonctionnement proche de la condition de *Binder* et *Kohn* à 40 Gb/s peut s'interpréter partiellement par une contribution de la réponse FM du laser plus large de celle de l'AM.

Débit	Portée (D1)	Portée (D2)	D2/D1	BER
	Modulation simple	Modulation duale		
10 Gb/s	90 km (mesuré)	180 km	2	$< 10^{-9}$
20 Gb/s	23 km (simulé)	39,7 km	1,72	10^{-9}
25 Gb/s	16 km (simulé)	24 km	1,5	$< 10^{-9}$
40 Gb/s	6 km (simulé)	10 km	1,66	$4 \cdot 10^{-9}$

Tableau 5: Performances de la modulation duale aux hauts débits

4.3. Génération et transmission des signaux SSB mono fréquence ou multi fréquence par le D-EML

4.3.1. Etude des signaux SSB mono fréquence

4.3.1.a. Dispositif expérimental

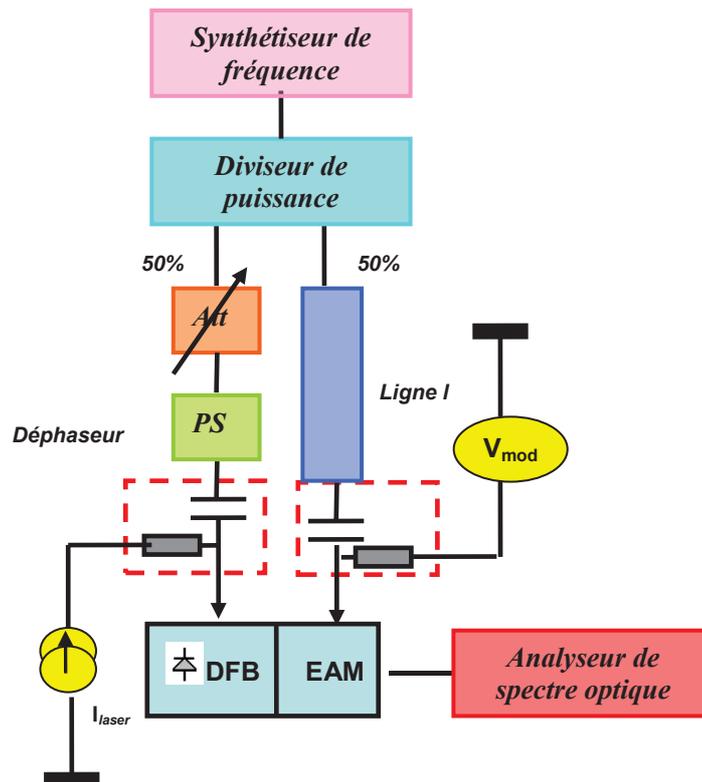


Figure 4.41: Dispositif expérimental de génération des signaux SSB par le D-EML

Nous avons vu dans le premier chapitre que le D-EML peut être utile pour la génération des signaux SSB (voir équations (1.93) et (1.94)) qui permettent de résoudre le problème d'évanouissement du signal le long de la fibre dans les systèmes de transmission radio sur fibre (RoF : Radio over Fibre). Ce paragraphe est consacré à une étude expérimentale permettant de tester ces propriétés. Le dispositif expérimental est donné par la figure 4.41.

On utilise un synthétiseur de fréquence permettant de générer un signal RF sinusoïdal à des fréquences différentes et de varier son amplitude. Un diviseur de puissance sert à équilibrer la modulation du laser et du modulateur. Le circuit de commande du laser est constitué d'un atténuateur RF permettant un réglage fin de l'amplitude du signal et une ligne à

retard (déphaseur) qui permet de varier finement le déphasage θ entre la modulation FM du laser et la modulation AM du modulateur. Le déphasage est défini par :

$$\theta = 2\pi \times f_m \times \frac{\Delta l}{v_g} \quad (4.1)$$

où Δl est la différence entre les longueurs électriques des circuits du laser et du modulateur. Du côté modulateur, nous utilisons simplement une ligne RF de longueur l afin d'égaliser électriquement les longueurs des deux circuits et donc garder un déphasage nul. L'optimisation du point de fonctionnement du D-EML pour la génération des signaux SSB se fait à l'aide d'un analyseur de spectre optique (OSA : Optical Spectrum Analyser). Par convention, nous estimons qu'un signal est de type SSB que lorsque le taux de suppression de la bande latérale (SSR : Sideband Suppression Ratio) est supérieur à 10 dB.

4.3.1.b. Résultats expérimentaux

Dans un premier temps, nous avons essayé d'optimiser le point de fonctionnement du D-EML ainsi que le déphasage θ pour avoir le SSR maximum (environ 21,99 dB) pour une fréquence donnée (figure 4.42(a)). Afin de valider expérimentalement la condition théorique donnée dans l'équation (1.93), nous avons effectué une mesure de la réponse temporelle en intensité et en fréquence du D-EML en gardant le même point de fonctionnement (figure 4.42(b)).

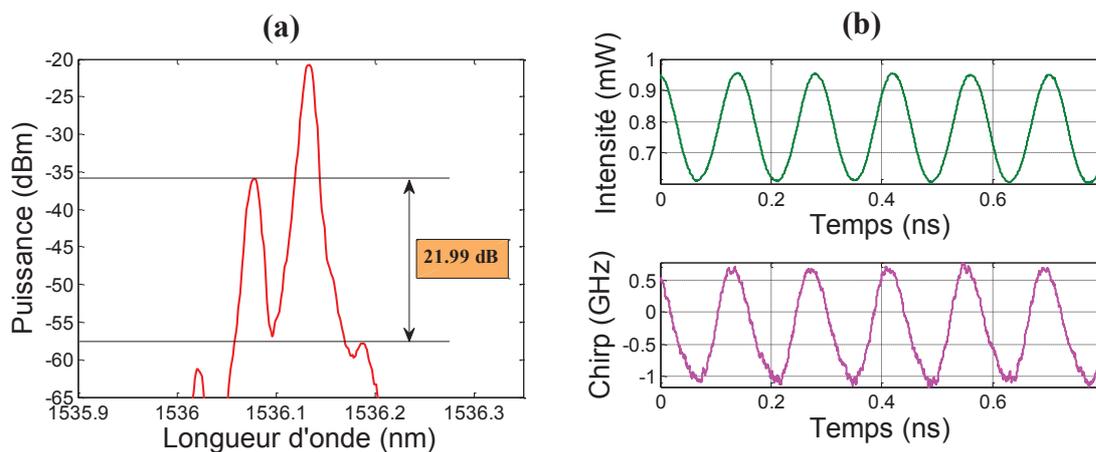


Figure 4.42: (a) Spectre d'un signal SSB généré par le D-EML pour une fréquence, (b) Réponse temporelle en intensité et en fréquence, $f_m = 7\text{GHz}$, $I_{laser} = 70\text{ mA}$, $V_{mod} = -2,6\text{V}$,

D'après la figure 4.42(b), l'indice de modulation d'intensité m_{IM} dont la valeur est de l'ordre de 0,22 et l'excursion en fréquence pic-à-pic $\Delta\nu_{pp}$ dont la valeur est de l'ordre de 1,6 GHz respectent bien la condition mentionnée dans l'équation (1.94).

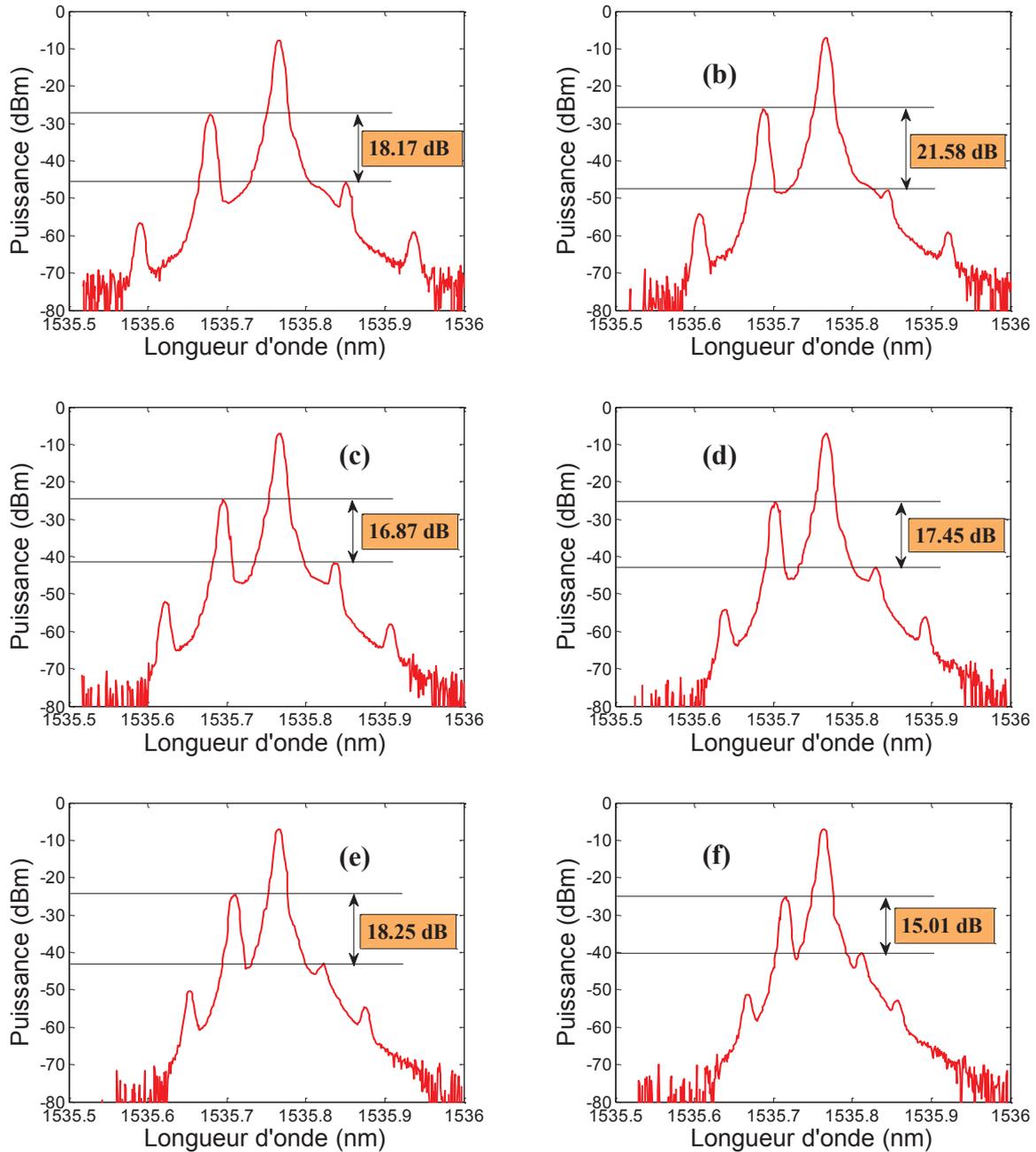


Figure 4.43: Spectre d'un signal SSB généré par le D-EML à différentes fréquences de modulation (a) 11 GHz, (b) 10 GHz, (c) 9 GHz, (d) 8GHz, (e) 7 GHz et (f) 6 GHz, $I_{laser} = 60$ mA, $V_{mod} = -2,6$ V, $P_{RF, Synthétiseur} = 8$ dBm

Dans un deuxième temps, nous avons essayé de générer les signaux SSB sur une plage de fréquences de 6 à 11 GHz en ne variant que I_{pp} et V_{pp} pour un point de polarisation du laser et du modulateur fixé. A ce stade, nous ne touchons pas le retard temporel entre les deux modulations (figure 4.43).

Le tableau 6 illustre la variation du point de fonctionnement du D-EML nécessaire pour avoir un maximum d'SSR pour une plage de fréquence entre 6 GHz et 11 GHz.

<i>Fréquence de modulation (GHz)</i>	<i>Att (dB)</i>	<i>P_{RF,DFB} (dBm)</i>	<i>P_{RF,EAM} (dBm)</i>	<i>SSR (dB)</i>
11	3	-6,02	-0,879	18,17
10	4	-7,65	-0,751	21,58
9	6	-8,56	-0,435	16,78
8	8	-10	-0,15	17,45
7	9	-9,7	0,248	18,25
6	11	-10,84	0,288	15,01

Tableau 6 : Evolution des points de fonctionnement du D-EML pour maintenir le contexte SSB pour des fréquences de modulation entre 6 GHz et 11 GHz, $I_{laser} = 60 \text{ mA}$, $V_{mod} = -2,6\text{V}$, $P_{RF,Synthétiseur} = 8 \text{ dBm}$

Les mêmes mesures associées à l'intervalle de fréquences [3GHz ; 6GHz] sont résumées dans le tableau 7.

<i>Fréquence de modulation (GHz)</i>	<i>Att (dB)</i>	<i>P_{RF,DFB} (dBm)</i>	<i>P_{RF,EAM} (dBm)</i>	<i>SSR (dB)</i>
6	11	-0,12	10,924	23
5	12	-1	10,954	16,5
4	13	-1,4	11,235	17,6
3	14	-2,7	113	12,6

Tableau 7: Evolution des points de fonctionnement du D-EML pour maintenir le contexte SSB pour des fréquences de modulation entre 3 GHz et 6 GHz, $I_{laser} = 60 \text{ mA}$, $V_{mod} = -2,6\text{V}$, $P_{RF,Synthétiseur} = 8 \text{ dBm}$

L'expérience montre que le SSR n'est pas conservé parfaitement lorsque la fréquence de modulation varie. Ceci est dû au fait que la variation de l'atténuation du signal RF qui attaque le laser engendre une modification de la longueur électrique du circuit et donc le déphasage n'est pas toujours nul entre les deux signaux modulateurs. Pour maintenir la valeur du SSR en fonction de la fréquence, il est nécessaire de régler finement le retard temporel entre les deux modulations.

La modulation duale permet donc de maintenir le caractère SSB du signal sur une large bande de fréquence de 5 GHz centré autour de 8,5GHz et une bande de 3 GHz centré autour de 4,5 GHz. L'augmentation de la fréquence de modulation nécessite une puissance RF

sur le laser plus grande et donc un indice de modulation FM plus élevé en maintenant une puissance RF constante sur le modulateur EAM ce qui est en accord avec la théorie.

Dans le but de confirmer expérimentalement la moindre sensibilité des signaux SSB à la dispersion chromatique, nous avons caractérisé la réponse d'une fibre dispersive de longueur de 75 km (SMF). Pour cela, nous avons gardé le montage expérimental de génération des signaux SSB décrit dans la figure 4.41 en remplaçant juste le synthétiseur par le VNA qui permet de générer des signaux RF de puissances faibles à différentes fréquences allant de 10 MHz à 15 GHz. A la sortie du D-EML, nous utilisons un amplificateur optique de type « booster » pour conserver une puissance constante à l'entrée de la fibre. En réception, une photodiode est placée au niveau la sortie RF du VNA. Le courant et la tension de polarisation du laser et du modulateur sont respectivement 60 mA et -2,6V.

Bien que les signaux générés par le D-EML ne soient pas parfaitement de type SSB puisque le VNA ne permet pas de modifier la puissance RF du signal pour chaque fréquence, la comparaison de la réponse fréquentielle de la fibre après propagation de ces signaux avec les signaux modulés par une modulation simple du modulateur seul, puis du laser seul montre une différence notable sur la platitude des réponses (figure 4.44).

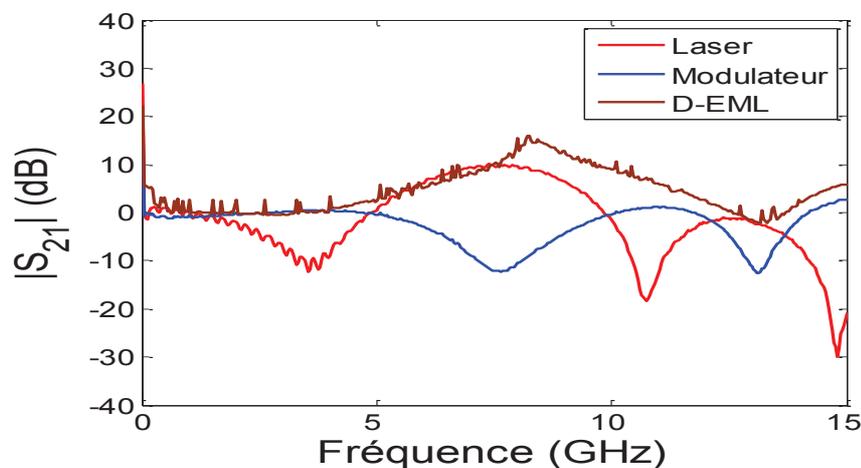


Figure 4.44: Réponse fréquentielle d'une fibre SMF standard de longueur 75 km suite à la propagation des signaux générés par le laser DFB, le modulateur EAM et le D-EML, $I_{laser} = 60$ mA, $V_{mod} = -2,6$ V

La figure 4.44 montre une succession de maxima et de trous pour les signaux modulés générés par l'EAM ou par le laser DFB. Leurs emplacements permettent de confirmer la nature principalement AM du modulateur et majoritairement FM du laser. En effet, les composantes fréquentielles de ces signaux de type DSB se propagent à des vitesses différentes à cause de la dispersion chromatique. En réception, le battement sur la photodiode entre la porteuse et chacune des bandes latérales peut se retrouver en phase pour certaines fréquences

de modulation et en opposition de phase pour d'autres. D'où l'origine des maximums et des trous. La réponse de la fibre pour les signaux SSB générés par le D-EML présente un seul maxima et un seul trou autour de 13 GHz. Cette réponse prouve une immunité plus grande à la dispersion chromatique de ces signaux quasi-SSB et donne la possibilité d'exploiter une large bande de fréquence pour la transmission des signaux OFDM. Une étude plus élaborée a débuté suite à ces mesures préliminaires [16]

4.3.2. Etude des signaux SSB multi-porteuses : cas des signaux OFDM

Dans les systèmes à haut débit, l'OFDM représente une nouvelle technique de modulation qui permet de battre l'ISI qui se produit dans les milieux de propagation dispersifs. Des travaux de recherches (projet ANR-EPOD²) sont actuellement concentrés sur l'évaluation de l'utilisation de ce format de modulation dans les réseaux optiques d'accès dans des architectures innovantes telles que TDM-PON et WDM-PON (Wavelength Division Multiplexing PON).

Dans cette partie, nous exposons les résultats d'une première expérience démontrant la possibilité de générer et de transmettre des signaux OFDM dans un contexte SSB à travers le D-EML. Cette expérience a été réalisée sur les équipements du laboratoire d'*Orange Labs* à Lannion par *Mohamed Chaïbi* (stagiaire Télécom ParisTech) et moi-même en collaboration sur place avec *Luis Anet Neto*.

4.3.2.a. Montage expérimental

Le maintien de la modulation SSB par le D-EML pour une bande de 5 GHz est un résultat très prometteur pour étudier la génération des signaux SSB-OFDM. D'après la figure 4.44 qui montre la réponse de la fibre pour une modulation simple de l'EAM après 100 km, on observe que le premier trou de fading (qui correspond au fait que la fibre transforme une modulation AM en FM) est situé à une fréquence de modulation de l'ordre de 6,5 GHz. En effet, nous avons modulé le D-EML par un signal OFDM en bande de base occupant une bande fréquentielle de 6 GHz. Ce signal est constitué de 256 sous-porteuses modulées en QPSK (Quadrature Phase Shift Keying). Le montage expérimental est montré dans la figure 4.45. Nous utilisons un AWG (Arbitrary Waveform Generator) permettant de générer un

² Projet de l'ANR : EPOD (Enhanced PON using OFDM modulation format), <http://www.systematic-paris-region.org/fr/projets/epod>

signal OFDM en bande de base à partir d'une séquence numérique générée par MATLAB. Le programme a été élaboré à *Orange Labs* pour des expériences antérieures [17]. Pour pouvoir moduler le laser et le modulateur simultanément, l'AWG génère deux signaux OFDM réels identiques sur ses deux voies.

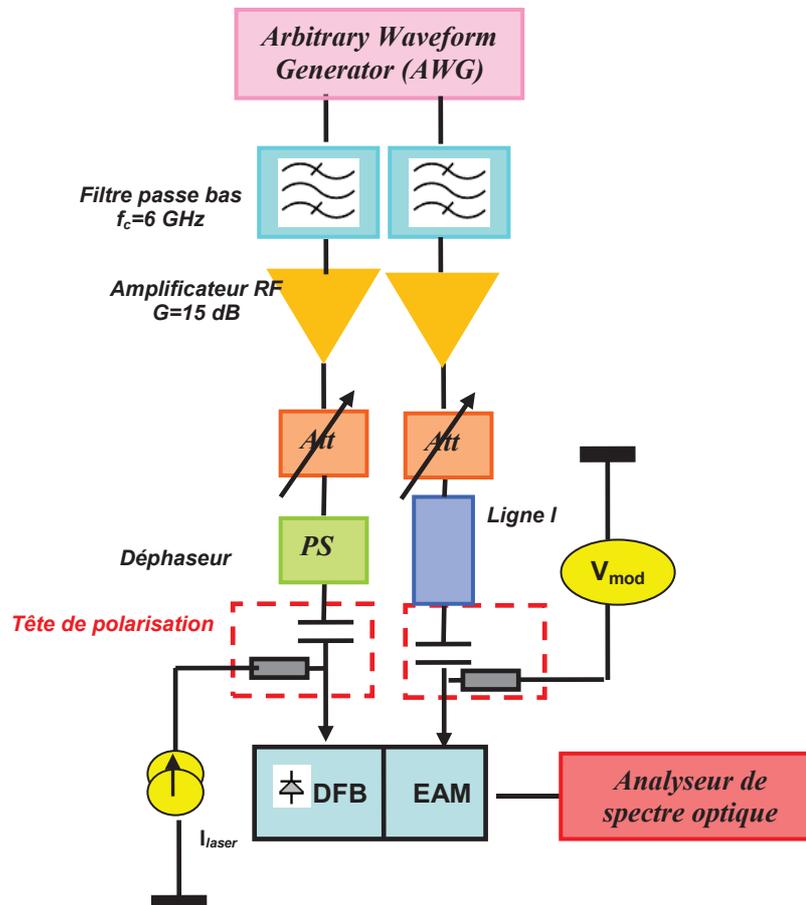


Figure 4.45: Montage expérimental de génération des signaux OFDM à travers le D-EML

4.3.2.b. Résultats expérimentaux

Le spectre du signal OFDM appliqué sur l'EAM (figure 4.46(a)) présente une amplitude fixe garantissant le même indice de modulation AM pour chaque fréquence. Le spectre du signal OFDM appliqué sur le laser (figure 4.46(b)) montre une variation linéaire de l'amplitude du signal en fonction de la fréquence tout en présentant une pente de 1 dB/GHz. Cette valeur de variation correspond au résultat de l'étude expérimentale de génération des signaux SSB sur une large bande de fréquence présentée dans le paragraphe précédent. Ceci permet de garantir le contexte SSB à chaque sous-porteuse OFDM. Les figures 4.46(c) et

4.46(d) présentent la forme temporelle du signal OFDM et la variation de son amplitude en fonction de sa densité de probabilité.

Les filtres passe-bas sont utilisés pour avoir des signaux OFDM de fréquences inférieures à 6 GHz. Ce choix est justifié par le fait que le premier trou dans la réponse d'une fibre de longueur 100 km à une modulation simple se situe à une fréquence de modulation de 6 GHz. L'ajustement des indices de modulation AM et FM est effectué à l'aide de deux atténuateurs RF variables avec un pas de 1 dB. Nous gardons le même point de fonctionnement du D-EML ($I_{laser} = 60$ mA, $V_{mod} = -2,6$ V). La puissance RF délivrée par l'AWG est de l'ordre de -8 dBm tandis que les atténuations appliquées sont respectivement 12 dB et 5 dB pour le laser et le modulateur.

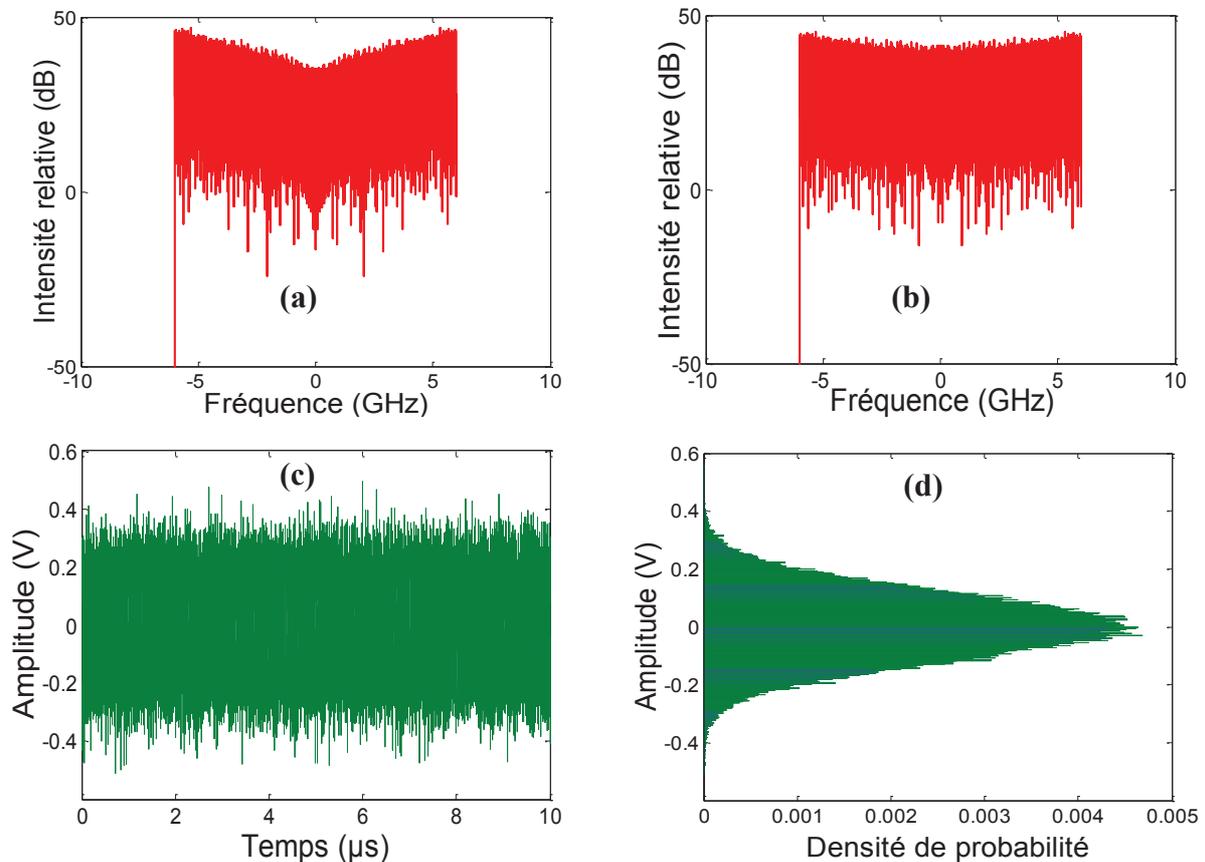


Figure 4.46: (a) Spectre des signaux OFDM appliqués au laser DFB (a) et au modulateur EAM (b), allure temporelle du signal OFDM (c), densité de probabilité du signal (d), $I_{laser} = 60$ mA, $V_{mod} = -2.6$ V, $P_{AWG} = -8$ dBm, Att(DFB) = 12dB, Att(EAM) = 5dB

Le spectre du signal OFDM reçu après propagation sur une fibre SMF de longueur 100 km de coefficient de dispersion chromatique de l'ordre de 17 ps/nm.km et de coefficient de perte de l'ordre de 0.2 dB/km est présenté dans la figure 4.47(a). Les figures 4.47(b) et 4.47(c) montrent l'amplitude du signal en fonction du temps et de sa densité de probabilité.

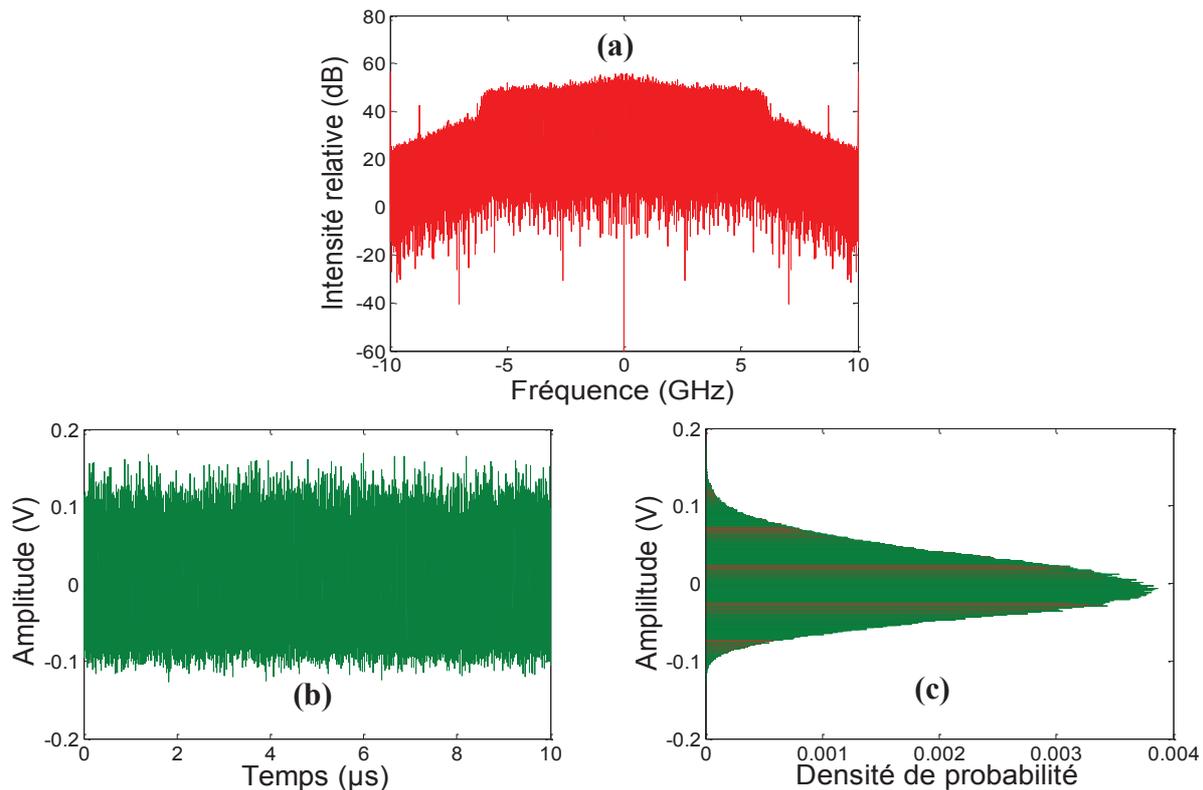


Figure 4.47: (a) Spectre du signal OFDM reçu après 100 km de propagation sur une fibre SMF, (b) allure temporelle du signal OFDM reçu, (c) densité de probabilité du signal reçu, $I_{laser} = 60 \text{ mA}$, $V_{mod} = -2,6\text{V}$, $P_{AWG} = -8 \text{ dBm}$, $Att(DFB) = 12 \text{ dB}$, $Att(EAM) = 5\text{dB}$

La réponse de la fibre et l'EVM (Error Vector Magnitude) par sous-porteuses OFDM relatives à la modulation duale (D-EML) et à la modulation simple de l'EAM (modulation externe) est présentée dans la figure 4.48.

Pour les faibles fréquences, la réponse de la fibre est constante (courbe bleue dans la figure 4.44) et donc l'EVM pour le D-EML et l'EAM varie faiblement (figure 4.48(b)). Pour les hautes fréquences au voisinage de 6 GHz ce qui correspond à la position du trou de fading (courbe bleue de la figure 4.44), l'EVM augmente fortement jusqu'à atteindre une valeur de 95% pour le cas d'une modulation simple alors qu'il augmente faiblement jusqu'à une valeur 30% pour le cas d'une modulation duale. Ce résultat préliminaire montre l'aptitude de la modulation duale à combattre la dispersion chromatique.