

La régénération optique à base de fibres optiques non-linéaires

Un des objectifs de ces travaux de thèse est la démonstration de régénérateurs optiques à base de fibres optiques non-linéaires. Dès le début de la thèse, nous nous sommes intéressés à la modélisation d'un des régénérateurs optiques les plus séduisants : le régénérateur dit "de Mamyshev". Nous présentons dans le paragraphe 4.1 le principe de ce régénérateur.

Dans le paragraphe 4.2 nous présentons les résultats de notre étude théorique. Nous commençons par étudier la fonction de transfert du régénérateur en fonction des caractéristiques de la fibre non-linéaire. Notre étude aboutit à la présentation d'un abaque permettant de qualifier simplement des fibres non-linéaires en vue de leur utilisation dans un régénérateur de Mamyshev à 40 Gbit/s. Nous proposons ensuite une étude théorique du régénérateur de Mamyshev en terme d'amélioration du facteur Q . Nous mettons en évidence un désaccord entre l'approche consistant à étudier la fonction de transfert du régénérateur et l'approche consistant à évaluer l'amélioration du facteur Q . Nous proposons une explication à ce désaccord.

Le paragraphe 4.3 est dédié aux études expérimentales du régénérateur de Mamyshev dans sa configuration la plus simple, c'est-à-dire la configuration simple-étage. Nous commençons par l'étude expérimentale de fonctions de transfert et poursuivons par l'étude de l'amélioration du facteur de qualité du signal. A cette occasion nous mettons en évidence le rôle néfaste de l'effet Brillouin et du mélange à quatre ondes dans le régénérateur de Mamyshev. Nous proposons une solution permettant de réduire ces effets, elle est basée sur l'utilisation d'un compresseur d'impulsions dans une configuration double-étage.

Le paragraphe 4.4 présente les résultats expérimentaux du régénérateur de Mamyshev dans sa configuration double-étage. Nous faisons la démonstration de l'efficacité d'une nouvelle configuration de régénérateur, incluant un compresseur d'impulsions.

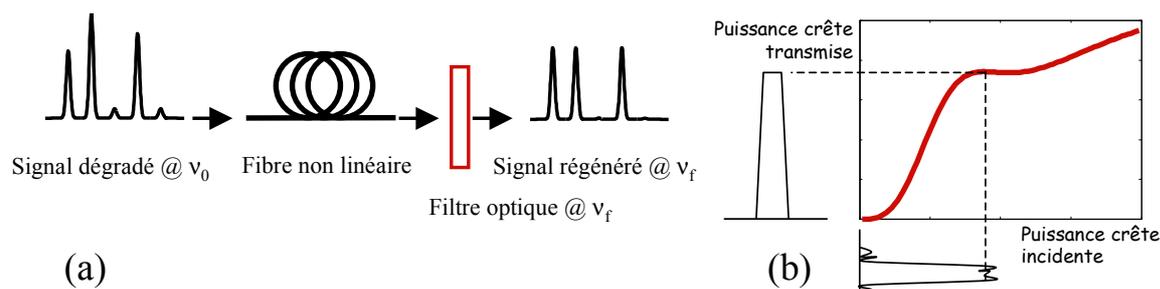


FIG. 4.1 – (a) Principe du régénérateur de Mamyshev, (b) fonction de transmission du régénérateur.

Le régénérateur de Mamyshev

4.1.1 Principe de base du régénérateur

En 1998, une des méthodes les plus séduisantes pour effectuer la régénération optique a été proposée par P. V. Mamyshev [12]. Le schéma du régénérateur est représenté sur la figure 4.1(a). Il est composé d'une fibre non-linéaire et d'un filtre optique.

L'effet Kerr, exacerbé dans la fibre optique non-linéaire, génère, par auto modulation de phase, des fréquences en dehors du spectre initial situé autour de ν_0 . Plus l'intensité optique est importante et plus les fréquences sont décalées. Seules les intensités atteignant un niveau suffisant sont transmises par le filtre centré en ν_f . Ce dispositif agit donc comme une porte optique non linéaire, dont la courbe de transmission non-linéaire est donnée sur la figure 4.1(b). Grâce à ce dispositif, le bruit sur les "0" et sur les "1" se trouve considérablement réduit. La largeur temporelle des impulsions en sortie du régénérateur est déterminée par la largeur du filtre de sortie.

On note que ce dispositif provoque une conversion de longueur d'onde du signal à régénérer. Si la conversion de longueur d'onde peut être un avantage dans certains cas (lorsqu'on associe à la fonction de régénération une fonction de routage optique par exemple), elle peut s'avérer gênante dans le cas où la seule fonction de régénération, transparente à la longueur d'onde, est recherchée. Pour éviter le phénomène de conversion de longueur d'onde, Mamyshev propose de cascader deux régénérateurs identiques mais de décalage fréquentiel opposé. Ceci permet de revenir à la longueur d'onde initiale. Nous appellerons cette configuration de régénérateur "double-étage" par opposition à la configuration "simple-étage" où la conversion de longueur d'onde n'est pas évitée.

La force de ce dispositif est sa simplicité et sa rapidité, associée au fait que c'est un composant entièrement passif, donc peu coûteux. Avec un temps de réponse de quelques femtosecondes seulement, l'effet Kerr n'est pas pénalisant. Il n'existe donc aucune contre-indication à utiliser cette technique dans les futurs systèmes à 160 Gbit/s et plus.

Nous allons maintenant présenter quelques résultats significatifs obtenus par différents groupes. Ils concernent des études aussi bien expérimentales que théoriques du régénérateur

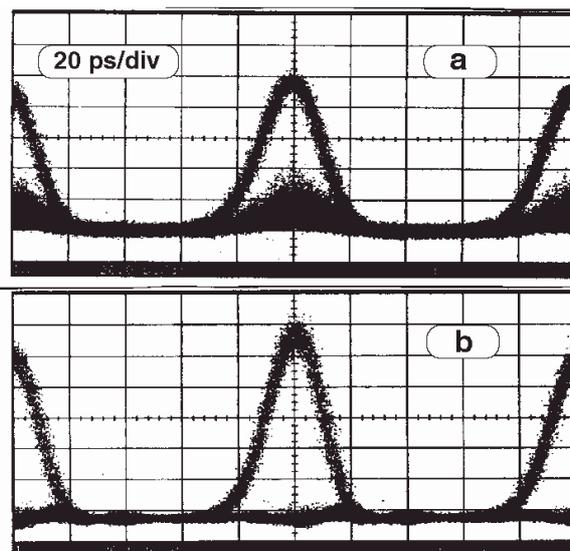


FIG. 4.2 – Diagramme de l’œil du signal en entrée (a) et en sortie (b) du régénérateur à base de 8 km de fibre DSF, d’après [12].

de Mamyshev.

4.1.2 Démonstrations expérimentales du régénérateur de Mamyshev

En 1998, Mamyshev a utilisé 8 km de fibre DSF pour une première démonstration de régénération à 10 Gbit/s [12]. La figure 4.2.a représente le diagramme de l’œil du signal en entrée du régénérateur ($T_{FWHM} = 20$ ps) et la figure 4.2.b présente le diagramme de l’œil du signal régénéré dans une configuration simple-étage. L’efficacité du dispositif est démontrée grâce à une meilleure ouverture du diagramme de l’œil en sortie par rapport au diagramme de l’œil en entrée.

En 2002, Raybon *et al.* associent, à une configuration double-étage, une modulation synchrone (afin de diminuer la gigue temporelle) pour réaliser une régénération complète à 40 Gbit/s ($T_{FWHM} = 7$ ps) [13]. Grâce à l’utilisation d’une boucle à recirculation de 400 km, les auteurs démontrent une transmission sans erreur du signal sur un million de kilomètres. La figure 4.3 montre l’évolution du TEB en fonction du seuil de décision après une transmission sur 10 000 km, 40 000 km, 100 000 km et 1 000 000 km.

L’efficacité du régénérateur est démontrée dans la mesure où, quelle que soit la longueur de transmission, le TEB reste inférieur à 10^{-10} pour une certaine plage du seuil de décision.

La fibre non-linéaire utilisée possède une dispersion de $-0,5$ ps/nm/km et une longueur de 2 km à 2,5 km. Les auteurs ne mentionnent pas la valeur du coefficient non-linéaire.

Depuis ces premières démonstrations, plusieurs groupes se sont consacrés à l’optimisation des paramètres du régénérateur de Mamyshev et à sa conception au moyen de fibres fortement non-linéaires :

- En 2004, Her *et al.* ont utilisé une fibre non-linéaire en silice pour démontrer une

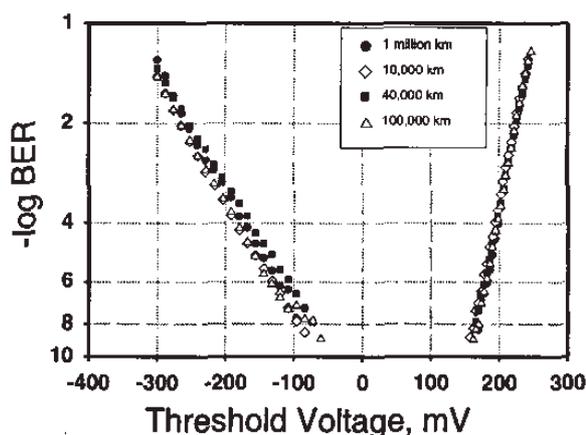


FIG. 4.3 – Evolution du TEB en fonction du seuil de décision après 10 000 km, 40 000 km, 100 000 km et 1 000 000 km à 40 Gbit/s, d'après [13].

amélioration du facteur Q de 1,5 dB avec un régénérateur à 40 Gbit/s ($T_{FWHM} = 6,25$ ps) [144]. La fibre utilisée avait les caractéristiques suivantes : $L = 2,5$ km, $D = -0,7$ ps/nm/km, $\alpha = 0,6$ dB/km, $\gamma = 8,4$ W⁻¹km⁻¹.

- En 2006, Parmigiani *et al.* démontrent la régénération à 10 Gbit/s et à 40 Gbit/s en utilisant 2 m de fibre non-linéaire en oxyde de bismuth avec $\gamma = 1\,100$ W⁻¹km⁻¹, $D = -260$ ps/nm/km et $\alpha = 0,9$ dB/m) [145]. Les auteurs montrent une amélioration de la sensibilité du récepteur de 5 dB à 10 Gbit/s et de 2 dB à 40 Gbit/s. La durée des impulsions en entrée est de 1,4 ps pour assurer une puissance crête suffisante avec 31 dBm de puissance moyenne. La durée du signal en sortie est de 6 ps, définie par un filtre décalé de 3,9 nm.
- Pour éviter d'avoir à cascader deux régénérateurs utilisant deux fibres différentes, Matsumoto propose en 2006 une configuration bidirectionnelle où la même fibre est utilisée pour les deux étages de régénération à 10 Gbit/s ($T_{FWHM} = 4,3$ ps) [146]. Il s'agit d'une fibre non-linéaire de 1,8 km avec $D = -0,35$ ps/nm/km, $\alpha = 0,52$ dB/km, $\gamma = 16,2$ W⁻¹km⁻¹. Les auteurs annoncent une très forte amélioration du taux d'extinction du signal en sortie par rapport au signal à l'entrée du régénérateur.
- Plus récemment, Provost *et al.* ont démontré la possibilité d'utiliser la configuration bidirectionnelle où la même fibre est utilisée pour régénérer deux canaux ($\lambda_1 = 1549,7$ nm et $\lambda_2 = 1554,2$ nm) à 10 Gbit/s ($T_{FWHM} = 6,3$ ps) [147]. La fibre utilisée a une longueur de 1 km, une valeur de dispersion de $-1,7$ ps/nm/km et elle possède un coefficient non-linéaire de 18 W⁻¹km⁻¹. Les résultats montrent une légère pénalité sur chaque canal : 0,1 dB sur le canal λ_1 et 0,4 dB sur le canal λ_2 .

Afin de faciliter la conception de régénérateurs ayant les meilleures performance possibles, notamment grâce à l'utilisation de fibres optiques fortement non-linéaires, certains groupes ont cherché à élaborer des règles de conception du régénérateur de Mamyshev. Nous allons les présenter dans le paragraphe suivant.

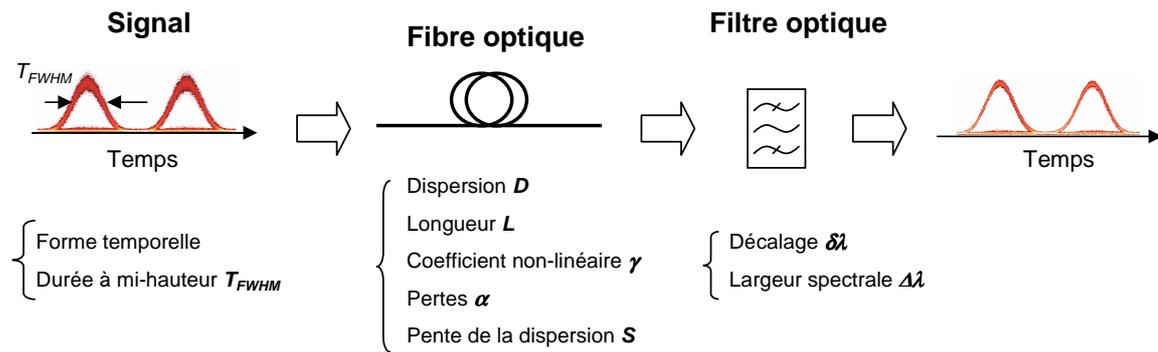


FIG. 4.4 – Schéma du régénérateur et paramètres associés.

4.1.3 Règles de conception du régénérateur

Un régénérateur est souvent considéré comme un composant ayant une réponse non-linéaire par rapport à la puissance du signal en entrée. Une fonction de transfert (FdT) en forme de marche d'escalier est souvent le but recherché mais cette forme est rarement obtenue en pratique. Dans la référence [148], les auteurs ont identifié trois types de FdT en fonction des paramètres du régénérateur. Ces paramètres sont identifiés sur la figure 4.4 et concernent aussi bien le signal (forme temporelle, durée des impulsions T_{FWHM}), la fibre (dispersion D , longueur L , coefficient non-linéaire γ , pertes α , pente de la dispersion S) et le filtre (décalage par rapport à la fréquence initiale $\delta\nu$ ou décalage par rapport à la longueur d'onde initiale $\delta\lambda$, bande passante $\Delta\lambda$). Selon les valeurs des paramètres, il existe des FdT de type "A" où l'évolution de la puissance des "1" en sortie présente un maximum en fonction de l'évolution de la puissance des "1" en entrée (figure 4.5.a), de type B où l'évolution de la puissance des "1" en sortie reste constante sur une certaine plage de variation de la puissance des "1" en entrée (figure 4.5.b) et de type "C" où l'évolution de la puissance des "1" en sortie augmente continûment en fonction de la puissance des "1" en entrée (figure 4.5.c). Comme nous verrons plus loin, la forme la plus adaptée à la régénération est la forme de type B qui se rapproche le plus de la marche d'escalier.

Pour faciliter la conception d'un régénérateur de type B, Provost *et al.* ont proposé deux formules approchées pour décrire la relation entre les paramètres du régénérateur pour une impulsion de forme gaussienne [148, 149] :

$$\frac{L}{L_D} = \sqrt{\frac{0,382}{N}} \quad (4.1)$$

et

$$\frac{\delta\nu}{F_0} = 0,71N - 2,13 \quad (4.2)$$

avec :

$$F_0 = \frac{1}{2\pi T_0} \quad (4.3)$$

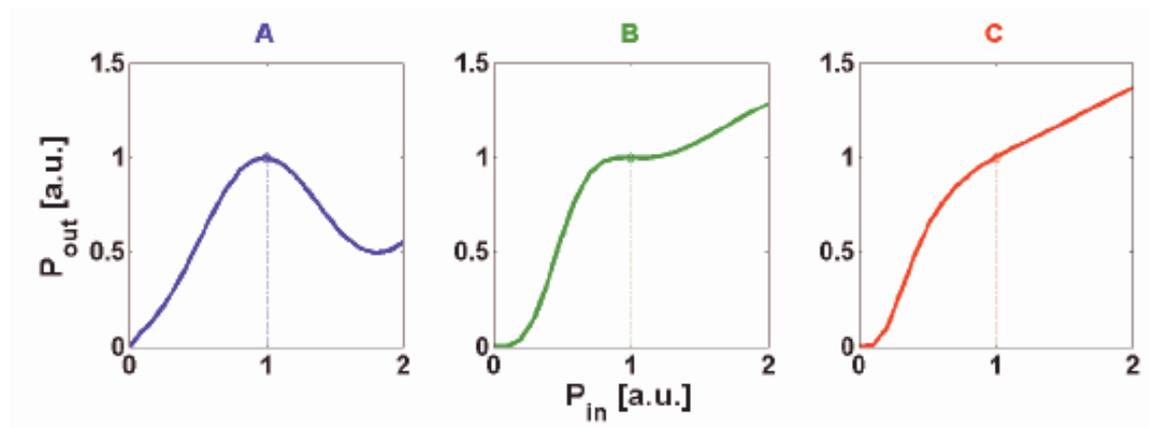


FIG. 4.5 – Trois types de FdT : (a) type A - évolution non-monotone, (b) type B - évolution présentant un plateau et (c) type C - évolution monotone.

où L est la longueur de fibre, L_D la longueur de dispersion, N l'ordre soliton, $\delta\lambda$ le décalage du filtre en sortie et T_0 la demi-durée (à $1/e$ de l'intensité maximale) des impulsions en entrée.

Ces relations ne prennent pas en compte tous les paramètres du régénérateur (les pertes et la pente de dispersion) mais elles sont très utiles pour concevoir un régénérateur de type B. Une version améliorée de ces relations prenant en compte les pertes de la fibre a également été proposée [150].

L'équation (4.1) est légèrement différente de la formule proposée par Her *et al.* [144] qui définit la longueur de fibre pour obtenir un élargissement spectral optimal :

$$L_{opt} \simeq 2,4 \frac{L_D}{N} \quad (4.4)$$

La différence peut provenir de la forme différente de l'impulsion utilisée. Elle est de forme sécante hyperbolique pour l'équation (4.4) et de forme gaussienne pour l'équation (4.1). Toutefois, nous avons vérifié que pour des valeurs de N comprises entre 12 et 19, les deux équations donnent des valeurs de L/L_D qui ne diffèrent pas plus de 10%.

Étude théorique des performances du régénérateur de Mamyshev

En 2003, le laboratoire Foton s'est engagé sur la voie de la régénération optique à base de fibres optiques non-linéaires. La modélisation du régénérateur de Mamyshev a été initiée au laboratoire dans le cadre de la thèse de Mathilde Gay [2] puis approfondie dans le cadre de mes travaux de thèse. Nous avons développé nos propres codes de simulation pour résoudre l'ENLS par la méthode MCLEM (voir chapitre 2) et évaluer les performances du régénérateur. L'objectif de nos études théoriques était d'optimiser les performances d'un régénérateur afin de pouvoir utiliser les fibres non-linéaires fabriquées par PERFOS et l'EVC.

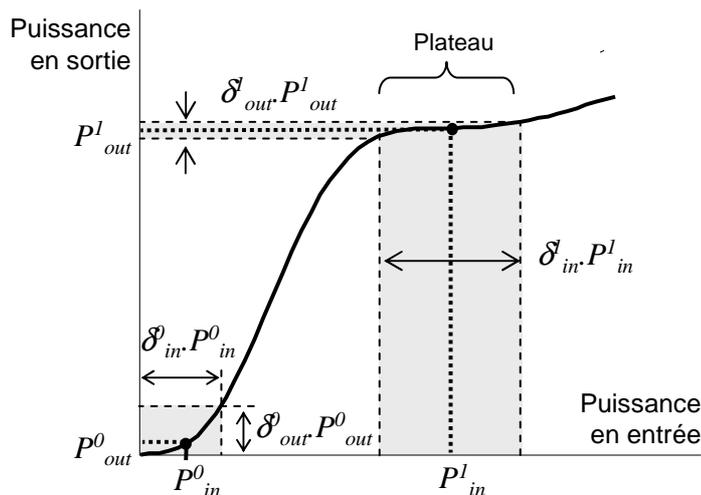


FIG. 4.6 – Fonction de transfert du régénérateur

Comme bien souvent avec l'étude de régénérateurs optiques, nous commençons par étudier leur FdT.

4.2.1 Etude des fonctions de transfert

Début 2005, parallèlement aux premières caractérisations de fibres non-linéaires de PER-FOS et de l'EVC, nous avons entrepris une étude systématique, basée sur la FdT, des performances du régénérateur de Mamyshev. Comme nous l'avons vu, la FdT représente l'évolution de la puissance crête d'une impulsion en sortie du régénérateur en fonction de la puissance crête de l'impulsion en entrée. Elle s'obtient par résolution numérique de l'ENLS.

La figure 4.6 représente un exemple de FdT du régénérateur de Mamyshev obtenue numériquement.

Les données dégradées à régénérer sont caractérisées par une puissance moyenne sur les "1", P_{in}^1 , associée à un bruit relatif, δ_{in}^1 (%), et une puissance moyenne sur les "0", P_{in}^0 , associée à un bruit relatif, δ_{in}^0 (%). De la même façon, on décrit les données régénérées par la puissance moyenne P_{out}^1 , associée à un bruit relatif, δ_{out}^1 (%), et la puissance moyenne P_{out}^0 , associée à un bruit relatif δ_{out}^0 (%). Les taux d'extinction, à l'entrée (ER_{in}) et à la sortie (ER_{out}) du régénérateur, sont donnés par $ER_{in,out} = P_{in,out}^1/P_{in,out}^0$. Une qualité du régénérateur peut être définie par sa capacité à améliorer le taux d'extinction : plus le rapport ER_{out}/ER_{in} est grand, plus le régénérateur est efficace. Une autre qualité du régénérateur est également évaluée par sa capacité à réduire le bruit sur les "1" et les "0" : plus les rapports $\delta_{out}^1/\delta_{in}^1$ et $\delta_{out}^0/\delta_{in}^0$ sont petits, plus le régénérateur est efficace.

On comprend intuitivement que le type de régénérateur qui permet d'augmenter le rapport d'extinction et de diminuer le bruit sur les "1" et sur les "0" simultanément est le régénérateur possédant une FdT type B en raison de la présence du plateau. Ce point a été vérifié théoriquement par Provost *et al.* [148] et nous avons pu vérifier dans la littérature

que la plupart des démonstrations expérimentales du régénérateur de Mamyshev ont été réalisées avec une FdT de type B.

Nous nous proposons maintenant d'étudier l'impact des paramètres du régénérateur sur la FdT et nous proposerons un abaque permettant de choisir simplement les paramètres qui optimisent les performances du régénérateur.

4.2.1.1 Impact des paramètres du régénérateur

Grâce aux règles de conception mentionnées précédemment, il est possible de trouver des jeux de paramètres conduisant à une FdT de type B. Chaque variation d'un des paramètres autour de ces valeurs conduit à une dérive de la FdT vers des formes moins appropriées, de types A ou C.

Dans le but de concevoir les régénérateurs de Mamyshev qui seront étudiés expérimentalement, il nous a donc paru intéressant d'étudier théoriquement l'influence de certains paramètres sur la forme de la FdT.

Le régénérateur que nous avons choisi d'étudier est conçu pour un débit de 40 Gbit/s et est réalisé à partir d'une fibre DSF. Notre étude reste valable pour d'autres types de fibres (plus non-linéaires par exemple) et d'autres débits, moyennant une transposition de la valeur de certains paramètres, en accord avec les relations (4.1) et (4.2). Les impulsions formant le signal ont une durée à mi-hauteur autour de 8 ps (similaire à un signal RZ 30% à 40 Gbit/s). La dispersion de la fibre DSF varie autour de valeurs faiblement négatives de $-0,1$ ps/nm/km à -1 ps/nm/km. Les pertes α sont de 0,25 dB/km. Le coefficient non-linéaire γ est de $2,6 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$. Si, par la suite, nous ne faisons pas mention de la pente de la dispersion, c'est que nous la considérons comme négligeable.

a. Variation de la forme du signal

La figure 4.7 montre l'impact de la variation de la forme du signal sur la forme de la FdT. Deux formes d'impulsions typiques sont prises en compte : la forme gaussienne et la forme sécante hyperbolique.

Nous constatons que la forme du signal modifie la forme de la FdT. Dans la pratique, aucune impulsion n'aura rigoureusement une forme gaussienne ou une forme sécante hyperbolique. Cependant, nous avons remarqué que la forme qui se rapprochait le plus des impulsions réelles était la forme gaussienne. Par la suite, sauf précisions contraires, les formes d'impulsion seront gaussiennes.

b. Variation de la largeur temporelle à mi-hauteur des impulsions

La figure 4.8 montre l'impact de la variation de la largeur temporelle des impulsions sur la forme de la FdT.

Nous constatons que la largeur temporelle des impulsions joue un rôle très important sur la forme de la FdT. Un changement d'environ 20 % sur la durée de l'impulsion occasionne un changement radical de la FdT en type A ou C, toutes choses égales par ailleurs.

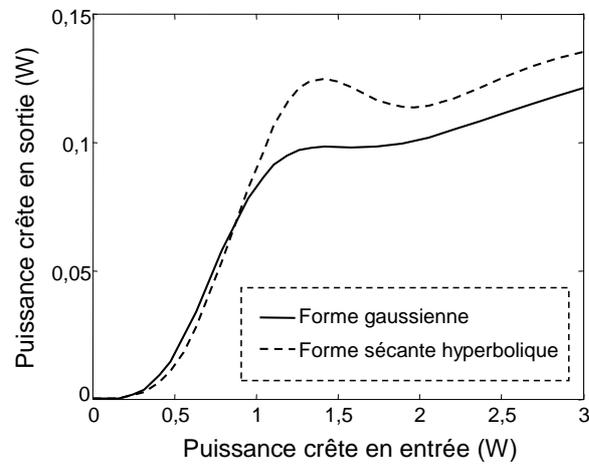


FIG. 4.7 – FdT pour différentes formes d’impulsion. Les paramètres du régénérateur sont les suivants : $T_{FWHM} = 8$ ps à 1550 nm, $L=5$ km, $\delta\lambda = 1,3$ nm, $D = -0,65$ ps/nm/km, $\Delta\lambda = 0,41$ nm.

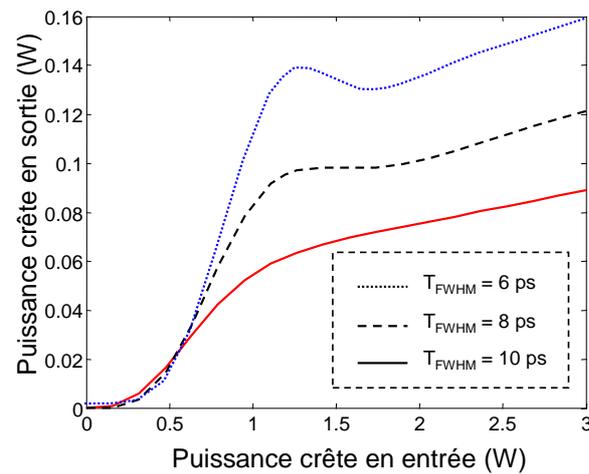


FIG. 4.8 – FdT pour différentes durées d’impulsions. Les paramètres du dispositif sont identiques à ceux de la figure 4.7.

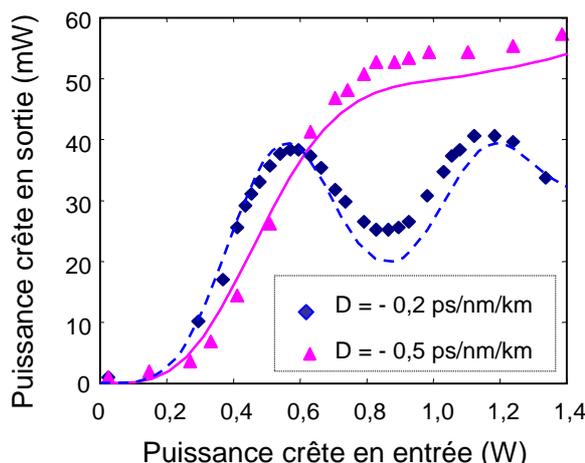


FIG. 4.9 – FdT pour différentes valeurs de la dispersion de la fibre en simulation (lignes) et obtenues expérimentalement (points). Les paramètres du dispositif sont les suivants : $T_{FWHM} = 8$ ps à 1545 nm (carrés) et à 1541 nm (triangles), $L = 9$ km, $\delta\lambda = 1,3$ nm et $\Delta\lambda = 0,41$ nm.

c. Variation de la valeur de la dispersion

La figure 4.9 montre l'impact de la variation de la valeur de la dispersion de la fibre sur la forme de la FdT. Ici, la variation de dispersion est obtenue en changeant la longueur d'onde du signal. Un changement de longueur d'onde dans une gamme de 4 nm est suffisant pour avoir un changement de 0,3 ps/nm/km de la valeur de la dispersion.

Nous constatons que la dispersion joue un rôle très important sur la forme de la FdT. Un contrôle précis de la valeur de la dispersion sera donc nécessaire pour l'élaboration d'un régénérateur de Mamyshev.

La figure 4.9 montre, par ailleurs, le bon accord entre les FdT théoriques et celles obtenues expérimentalement au laboratoire.

d. Variation de la longueur de la fibre

La figure 4.10 montre l'impact de la variation de la longueur de fibre utilisée sur la forme de la FdT. Trois tronçons de fibres de longueurs respectives 2 km, 3 km et 4 km ont été utilisés.

Les FdT présentées sur la figure 4.10 montrent que la longueur de fibre influence fortement la forme de la FdT. La puissance P_{in}^1 (définie sur la figure 4.6) est significativement augmentée lorsque L diminue.

Ici également, nous noterons le bon accord entre théorie et expérience.

e. Variation du coefficient non-linéaire

La figure 4.11 montre l'impact de la variation du coefficient non-linéaire de la fibre sur la forme de la FdT. Trois cas, avec une différence de 50% du coefficient non-linéaire, ont été étudiés.

Nous constatons que la forme de la FdT n'est que légèrement modifiée. Ce qui change de manière significative, c'est la puissance crête P_{in}^1 correspondant à la zone du plateau.

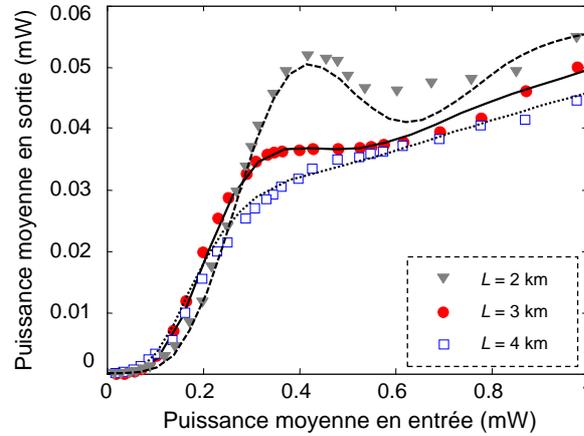


FIG. 4.10 – FdT pour différentes longueurs de fibre en simulation (lignes) et obtenues expérimentalement (points). Les paramètres du dispositif sont les suivants : $T_{FWHM} = 7,5$ ps à 1536,6 nm, $\delta\lambda = 1,5$ nm, $D = -0,9$ ps/nm/km et $\Delta\lambda = 0,51$ nm à 1535,1 nm.

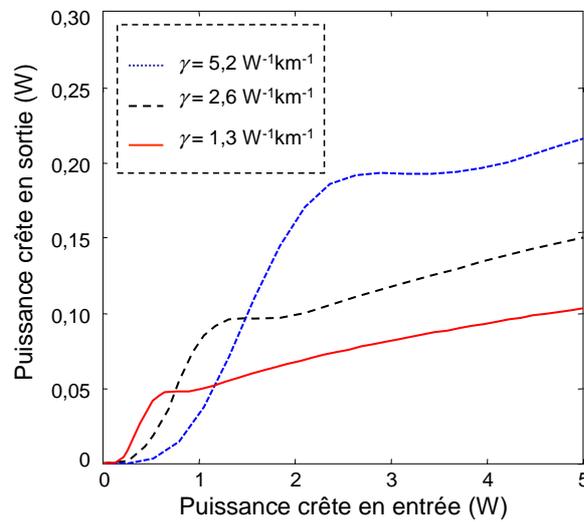


FIG. 4.11 – FdT pour différents coefficients non-linéaires. Les paramètres du dispositif sont les suivants : $T_{FWHM} = 8$ ps à 1550 nm, $L = 5$ km, $\delta\lambda = 1,3$ nm, $D = -0,65$ ps/nm/km et $\Delta\lambda = 0,41$ nm.

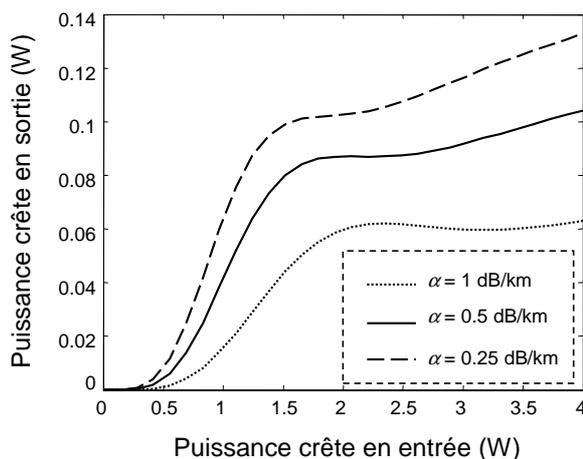


FIG. 4.12 – FdT pour différentes valeurs des pertes. Les paramètres du dispositif sont les suivants : $T_{FWHM} = 8$ ps à 1550 nm, $L = 5$ km, $\delta\lambda = 1,5$ nm, $D = -0,65$ ps/nm/km et $\Delta\lambda = 0,41$ nm.

De plus, grands coefficients non-linéaires permettent une puissance de fonctionnement plus faible, tout en gardant une forme de type B.

f. Variation des pertes

La figure 4.12 montre l'impact de la variation des pertes de la fibre sur la forme de la FdT. Trois cas, avec une différence de 50% des pertes, ont été étudiés.

Nous constatons qu'une augmentation des pertes provoque une augmentation de la puissance crête P_{in}^1 nécessaire pour atteindre la zone du plateau ainsi qu'une diminution de la puissance en sortie du régénérateur. Il est évident que les meilleures performances seront atteintes avec les fibres présentant le moins de pertes possible.

g. Variation du décalage du filtre en sortie

Le filtre en sortie de la fibre est décalé par pas de 0,5 nm et les FdT sont tracées sur la figure 4.13.

Le décalage du filtre modifie non seulement le type de FdT (A, B ou C) mais il intervient également sur la réduction du bruit sur les "0". Plus le filtre est décalé, meilleure est la réduction du bruit sur les "0". Par contre, la puissance moyenne requise est plus importante. Le choix du décalage du filtre est donc un compromis entre la réduction du bruit sur les "0" et le coût du dispositif en terme de puissance optique.

Nous notons également le bon accord entre théorie et expérience.

h. Variation de la largeur spectrale du filtre en sortie

La figure 4.14 montre l'influence du changement de la largeur spectrale du filtre sur la forme de la FdT. Des filtres de différentes largeurs spectrales ont été utilisés et le décalage $\delta\lambda$ a été fixé à 1,5 nm.

Nous ne constatons pas de grand impact sur la forme de la FdT du régénérateur mais sur le rendement en termes de puissance du régénérateur. Plus la largeur spectrale du filtre est grande, plus la puissance du signal en sortie est grande. Il nous faut cependant rappeler que

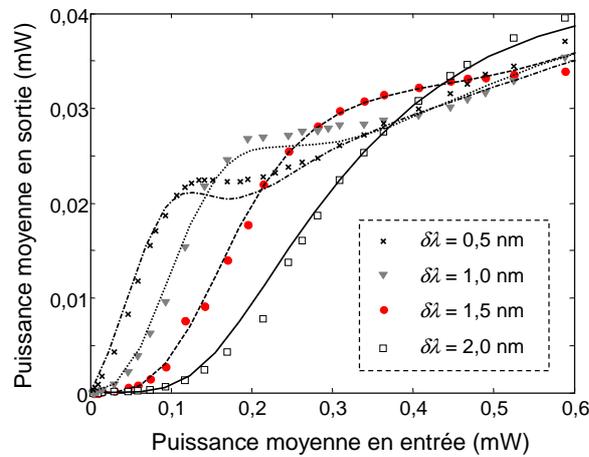


FIG. 4.13 – FdT pour différents décalages du filtre en sortie de la fibre en simulation (lignes) et obtenues expérimentales (points). Les paramètres du dispositif sont les suivants : $T_{FWHM} = 6,5$ ps à 1536 nm, $L = 3$ km, $D = -0,93$ ps/nm/km et $\Delta\lambda = 0,51$ nm.

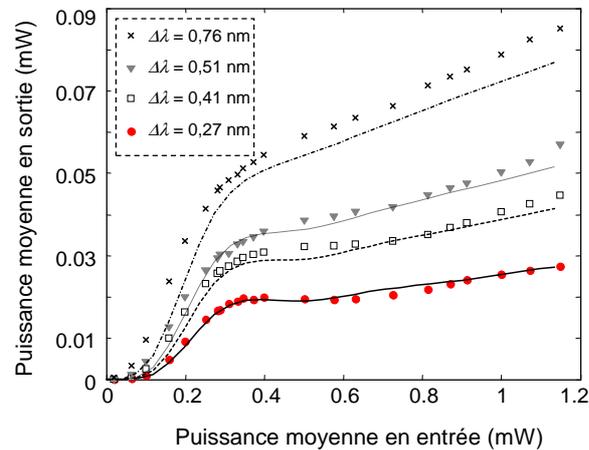


FIG. 4.14 – FdT pour différentes larguer à mi-hauteur du filtre en sortie en simulation (lignes) et obtenues expérimentalement (points). Les paramètres du dispositif sont les suivants : $T_{FWHM} = 8,5$ ps à 1537 nm, $\delta\lambda = 1,5$ nm, $L = 4$ km, $D = -0,85$ ps/nm/km, $\Delta\lambda = 0,27$ nm/0,41 nm/0,51 nm/0,76 nm à 1535,5 nm.

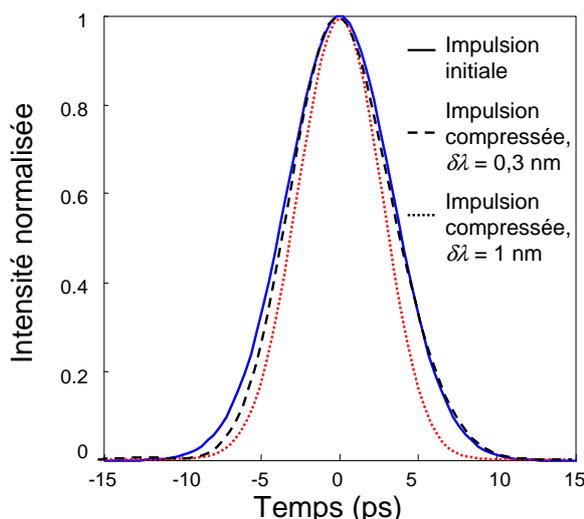


FIG. 4.15 – (a) Impulsion initiale et impulsions compressées pour différents décalage du filtre. Les paramètres du dispositif sont les suivants : $T_{FWHM} = 8$ ps à 1540 nm, $L = 7$ km, $D = -0,55$ ps/nm/km et $\Delta\lambda = 0,76$ nm.

c'est la largeur du filtre de sortie qui fixe la largeur temporelle des impulsions en sortie de régénérateur. Lors des expériences de régénération en boucle à recirculation, nous n'aurons donc guère le choix de la largeur du filtre puisque la durée des impulsions en sortie devra correspondre à la durée des impulsions en entrée.

La figure 4.14 montre le bon accord entre les FdT théoriques et celles obtenues expérimentalement.

Nous voulons attirer l'attention du lecteur sur le fait que le choix d'une largeur spectrale plus large que celle du signal peut servir à réaliser un compresseur d'impulsions [151]. En effet, la durée des impulsions de sortie d'un système constitué d'une fibre non-linéaire et d'un filtre décalé dépend du produit entre la fonction de transmission du filtre et le spectre élargi par SPM. On imagine alors très bien qu'un choix judicieux de largeur du filtre et du décalage du filtre peut conduire à des impulsions en sortie plus courtes que les impulsions en entrée. La figure 4.15 présente des impulsions calculées en sortie d'un compresseur pour différents décalages spectraux $\delta\lambda$ du filtre de sortie. On remarque qu'avec un filtre de sortie de largeur à 3 dB $\Delta\lambda = 0,76$ nm, pour des impulsions initiales de largeur spectrale de 0,45 nm, il est théoriquement possible de compresser les impulsions et, qui plus est, d'ajuster leur durée en jouant sur le décalage $\delta\lambda$ du filtre. Nous verrons plus loin l'intérêt d'utiliser un compresseur d'impulsions pour la régénération optique de type Mamyshev.

i. Variation d'autres paramètres lorsque la dispersion est proche de zéro

D'après l'équation (4.1), N étant fixé par l'équation (4.2), le rapport L/L_D (ou si l'on préfère DL/T_0^2) doit être égal à une constante.

Si l'on décide de diminuer T_0 (en augmentant le débit par exemple), on devra diminuer L ou D . Or, si le coefficient non-linéaire de la fibre n'est pas très élevé, on préférera diminuer

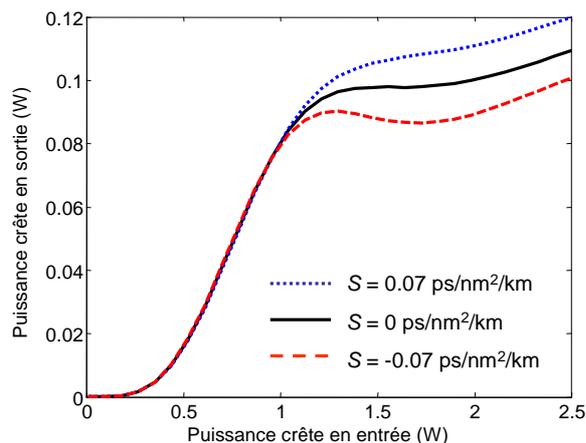


FIG. 4.16 – FdT pour différentes valeurs de la pente S de dispersion si D est proche de la dispersion nulle. Les paramètres du dispositif sont les suivants : $T_{FWHM} = 8$ ps à 1550 nm, $L = 5$ km, $\delta\lambda = 1,3$ nm ($\nu_f > \nu_0$), $D = -0,65$ ps/nm/km et $\Delta\lambda = 0,41$ nm.

D plutôt que L pour garder une puissance optique P_{in}^1 faible.

Lorsque D se rapproche de zéro, des paramètres qui étaient négligés jusqu'alors, à savoir la pente S de la dispersion et la variation de la dispersion le long de la fibre, prennent alors de l'importance.

Variation de la pente de la dispersion

La figure 4.16 montre l'impact de la variation de la pente de la dispersion sur la forme de la FdT. Ici, nous fixons la fréquence centrale du filtre de sortie ν_f de telle sorte que $\nu_f > \nu_0$ où ν_0 est la fréquence optique initiale.

Les résultats de simulation montrent que la pente de la dispersion influence la forme de la FdT du régénérateur. Notons que le rôle du signe de la pente peut être inversé en changeant la position relative du filtre en sortie par rapport à la fréquence ν_0 .

Fluctuation de la dispersion le long de la fibre

La figure 4.17 montre l'impact de la variation de la dispersion le long de la fibre. En supposant que la variation est périodique et de forme sinusoïdale, nous avons étudié à la fois l'impact de la période ainsi que de l'amplitude des fluctuations.

Les résultats obtenus montrent que si la période est petite (inférieure à $L/2$), il y a peu d'impact sur la FdT même si l'amplitude AV de la variation atteint 200% (figure 4.17.a). Pour une période de variation de 1 km, nous avons remarqué le résultat intéressant suivant. Avec une amplitude de variation AV de 400%, nous obtenons un élargissement significatif de la zone du plateau pour le régénérateur de type B (figure 4.17.a), ce qui offre un intérêt potentiel pour une meilleure réduction du bruit sur les symboles "1". Si la période est plus grande (figure 4.17.b), l'élargissement de la zone du plateau dans la FdT de type B est moins marqué.

Cette étude montre qu'il devrait être possible d'améliorer les performances du régénérateur en combinant des fibres de différentes valeurs de dispersion. La figure 4.18 illustre

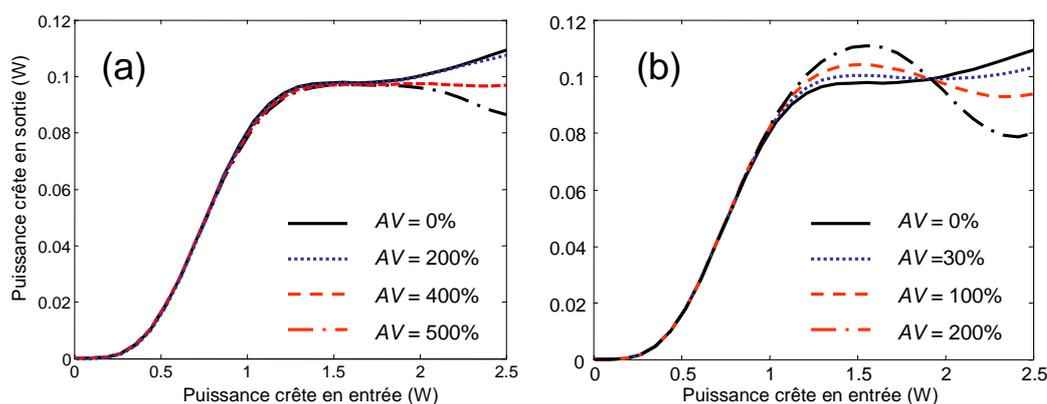


FIG. 4.17 – FdT pour une variation spatiale périodique de la dispersion (profil sinusoïdal) tous les 1 km (a) et 2,5 km (b). Les paramètres du dispositif sont les suivants : $T_{FWHM} = 8$ ps à 1550 nm, $L = 5$ km, $\delta\lambda = 1,3$ nm, $D = -0,65$ ps/nm/km, $S = 0$ ps/nm²/km, $\Delta\lambda = 0,41$ nm. AV = amplitude de la variation.

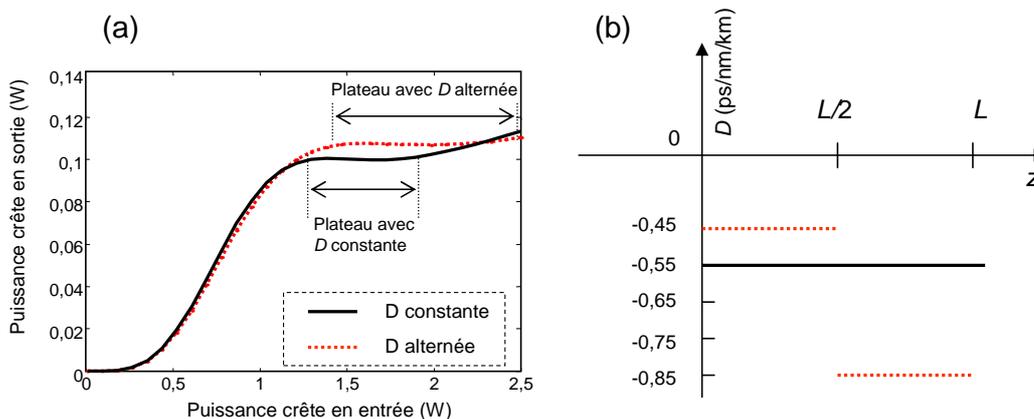


FIG. 4.18 – (a) FdT dans le cas d'une fibre de dispersion constante et dans le cas de deux fibres de dispersions alternées. (b) Distribution de la dispersion des fibres à dispersion alternée en fonction de la longueur L . Les paramètres du dispositif sont les suivants : $T_{FWHM} = 8$ ps à 1550 nm, $L = 5$ km, $\delta\lambda = 1,3$ nm ($\nu_f > \nu_0$), $S = 0,07$ ps/nm²/km et $\Delta\lambda = 0,41$ nm.

cette possibilité en combinant deux tronçons de fibre dont la dispersion est légèrement plus faible et légèrement plus élevée que la dispersion idéale.

On remarque une nette amélioration de la largeur de la zone du plateau pour les "1".

La nouvelle fonction de transfert permet d'envisager la possibilité de supprimer le bruit sur des "1" pour des signaux très dégradés (fort δ_{in}^1) en entrée.

Résumé

Nous résumons, dans le tableau 4.1, l'effet des différents paramètres étudiés dans ce paragraphe sur la forme de la FdT du régénérateur de Mamyshev.

| Paramètres | Influence | Sens de variation des valeurs pour passer du type A au type C |
|---------------------------------|---------------------------|---|
| Forme d'impulsions | faible | - |
| Largeur temporelle | forte | ↘ |
| Dispersion de la fibre | forte | ↗ |
| Longueur de la fibre | forte | ↗ |
| Non-linéarité de la fibre | faible | - |
| Pertes | faible | ↗ |
| Décalage du filtre | forte | ↗ |
| Largeur spectrale du filtre | forte | ↗ |
| Pente de dispersion | forte si $D \simeq 0$ | - |
| Variation de D le long de L | faible si Période $< L/2$ | - |

TAB. 4.1 – Influence des paramètres sur la forme de la FdT du régénérateur de Mamyshev.

4.2.1.2 Abaque pour la conception d'un régénérateur à 40 Gbit/s

Dans cette partie, nous proposons une abaque qui illustre, de manière synthétique et visuelle, les règles de conception pour obtenir un régénérateur de Mamyshev de type B à 40 Gbit/s.

En supposant que les pertes des fibres sont négligeables, nous appliquons les deux équations (4.1) et (4.2) utilisées pour la conception d'un régénérateur de type B. Nous fixons la longueur d'onde λ_0 à 1550 nm, le débit à 40 Gbit/s et la largeur temporelle T_{FWHM} à 8 ps. Ceci conduit à une demi-durée temporelle T_0 de 4,8 ps si l'on considère une forme gaussienne. Nous choisissons la valeur $\delta\nu$ du décalage du filtre comme un compromis entre un faible décalage qui n'améliore pas assez le taux d'extinction et un fort décalage qui augmente trop la puissance P_{in}^1 requise. En outre, pour préserver la forme du spectre du signal, il nous faut placer le filtre à une distance multiple de 40 GHz [51]. Par conséquent, une valeur de 160 GHz ($\delta\lambda \approx 1,3$ nm) est un bon compromis pour $\delta\lambda$. Nous obtenons donc la valeur de 4,83 pour $\delta\nu/F_0$.

Des équations (3.3), (3.4), (4.1) et (4.2), nous déduisons :

$$DL = -\frac{2\pi c T_0^2}{\lambda_0^2} \sqrt{\frac{0,382}{\frac{1}{0,71} \left(\frac{\delta\nu}{F_0} + 2,13 \right)}} \quad (4.5)$$

et

$$L = \left[\frac{1}{0,71} \left(\frac{\delta\nu}{F_0} + 2,13 \right) \right]^{\frac{3}{2}} \frac{\sqrt{0,382}}{P_0\gamma} \quad (4.6)$$

En utilisant les valeurs précédentes, pour λ_0 , T_0 et $\delta\nu/F_0$, nous obtenons :

$$DL \approx -0,0036 \quad (4.7)$$

et

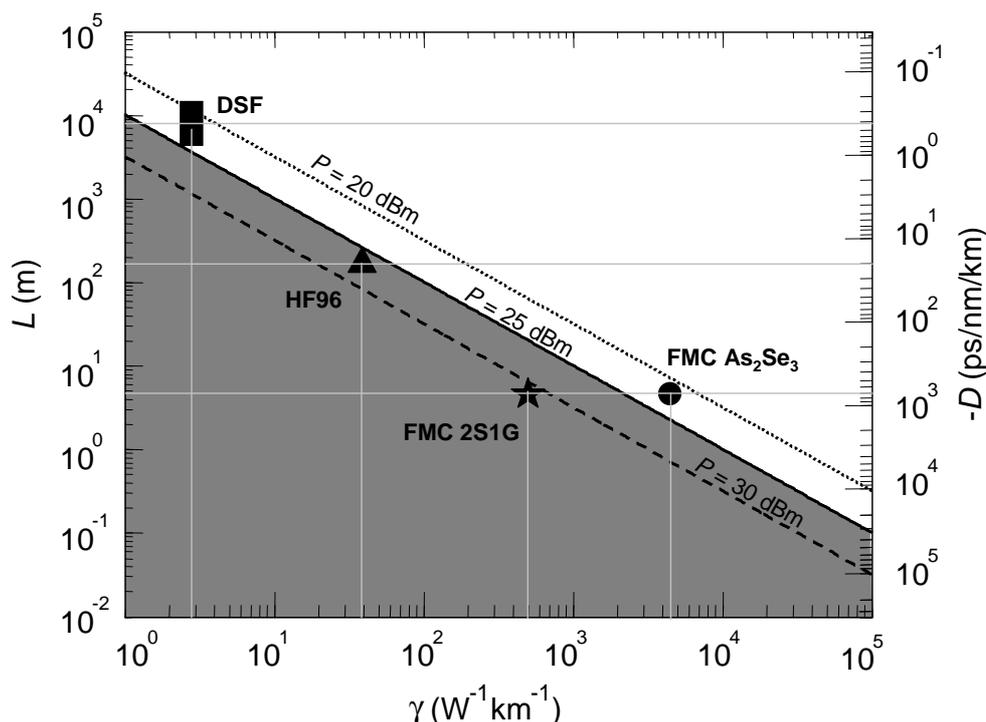


FIG. 4.19 – Abaque de conception d'un régénérateur de Mamyshev à 40 Gbit/s.

$$L \approx \frac{19}{P_0 \gamma} \quad (4.8)$$

La figure 4.19 illustre notre abaque de conception du régénérateur à 40 Gbit/s.

Sur notre abaque, la longueur L et la dispersion D sont tracées en fonction du coefficient non-linéaire γ de la fibre non-linéaire utilisée pour le régénérateur. La gamme de valeurs couvertes par γ va de $1 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ à $100\,000 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$. Notre abaque couvre donc toutes les valeurs possibles de fibres non-linéaires. La ligne continue est la ligne iso-puissance de valeur 25 dBm. Elle divise l'abaque en deux zones : une zone pour laquelle une forte puissance est requise (zone grise) et une zone de faibles puissances requises (zone blanche). Les fibres se situant dans la zone blanche offrent donc un fort potentiel pour les applications de régénération.

Nous avons positionné sur notre abaque les fibres non-linéaires disponibles dans notre laboratoire.

Nous constatons que la fibre DSF possède une grande flexibilité de réglage de la dispersion. Cette fibre tombe dans la zone de faible puissance, ce qui signifie qu'elle est un candidat intéressant pour réaliser un régénérateur. Par contre, plusieurs km de fibre sont nécessaires.

Pour la fibre HF96, malgré le fait qu'il soit possible d'obtenir une FdT de type B pour une régénération avec 150 m de fibre, la puissance requise est élevée (environ 27,5 dBm). Il est possible de diminuer la puissance requise en utilisant plus de longueur (par exemple

200 m). Toutefois, si nous augmentons L , la forme de la FdT va évoluer d'une forme de type B vers une forme de type C (voir le tableau 4.1). Pour compenser cette tendance, nous devons ajuster les autres paramètres du régénérateur conduisant à une tendance inverse. À l'aide du tableau 4.1, nous trouvons quatre solutions : soit nous augmentons la largeur temporelle du signal, soit nous diminuons la largeur spectrale du filtre en sortie, soit nous diminuons le décalage du filtre en sortie, soit nous combinons ces différentes solutions.

Pour la fibre FMC 2S1G, en supposant que la dispersion de cette fibre soit de l'ordre de -700 ps/nm/km (valeur estimée par le fabricant), la situation est similaire à celle de la fibre HF96. Par contre la puissance requise est plus importante que celle de la fibre HF96 (environ 32 dBm) et nous ne pouvons pas utiliser de longueur plus longue pour ce type de fibre à cause des pertes importantes. Il n'est donc pas possible de faire un régénérateur de type B avec cette fibre.

En ce qui concerne la fibre FMC As₂Se₃, en supposant que la dispersion de cette fibre soit de l'ordre -700 ps/nm/km (valeur estimée par le fabricant) et dans la perspective où les pertes de cette fibre pourraient être très réduites, nous constatons un fort potentiel pour réaliser un régénérateur compact (4,5 m), à une puissance raisonnable (22 dBm). Malheureusement, à l'heure actuelle, les pertes de cette fibre restent trop élevées (10 dB/m).

4.2.2 Réduction du bruit dans le régénérateur de Mamyshev

Forts de notre expérience acquise en matière de modélisation du régénérateur de Mamyshev au moyen des FdT, nous nous sommes intéressés à une analyse beaucoup plus fine du mécanisme de réduction du bruit dans un tel régénérateur [51]. Si l'analyse présentée dans le paragraphe précédent permet de concevoir un régénérateur présentant une FdT de type B, l'étude que nous allons présenter maintenant va permettre de quantifier les performances du régénérateur en termes d'amélioration du facteur Q du signal.

4.2.2.1 Dégradation du signal par une source de bruit blanc

Notre approche consiste à décrire, de façon la plus réaliste possible, la régénération puis la détection d'un train de données dégradées par le bruit des amplificateurs optiques. Le schéma décrivant notre modélisation est représenté par la figure 4.20. Le bloc de transmission consiste à superposer, dans le domaine spectral, le bruit blanc correspondant à l'émission spontanée des amplificateurs optiques à un train de données (impulsions gaussiennes) issu d'un modulateur à 40 Gbit/s (voir figure 4.21.a également). Dans notre approche, le bloc symbolisant le régénérateur de Mamyshev contient un filtre d'entrée qui est en général omis dans la plupart des études théoriques. Son intérêt sera expliqué plus tard. Le bloc de détection consiste en une détection quadratique accompagnée d'un filtrage.

Dans l'étude que nous allons présenter, les paramètres de simulation (largeur d'impulsions, caractéristiques de la fibre, etc.) sont très proches des paramètres expérimentaux rapportés par Her *et al.* [144] : $T_{FWHM} = 6,25$ ps, $L = 2,5$ km, $\gamma = 8,4$ W⁻¹km⁻¹,

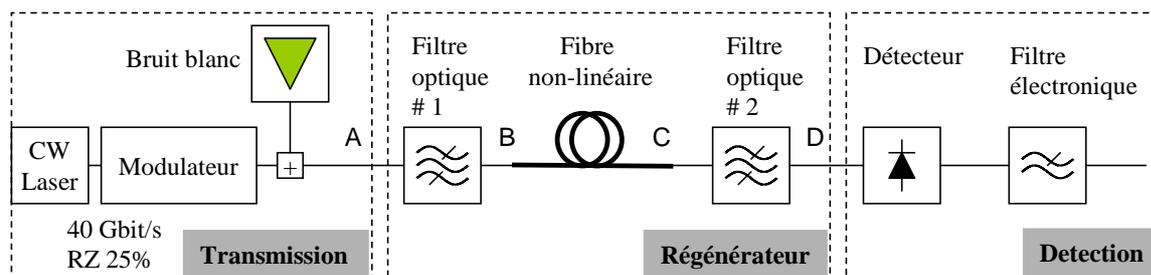


FIG. 4.20 – Schéma utilisé pour la modélisation du régénérateur de Mamyshev.

$D = -0.7$ ps/nm/km, $\alpha = 0,6$ dB/km, $\delta\lambda = 1,6$ nm. La figure 4.21 représente les spectres du signal et du bruit obtenus numériquement à différents endroits du régénérateur correspondant aux points A, B, C et D de la figure 4.20. Elle donne une vision spectrale du principe du régénérateur.

Du signal calculé en détection, nous déduisons le diagramme de l’œil, dont la qualité est mesurée à l’aide du facteur Q qui s’exprime par l’équation (1.8).

Nous déduisons de nos calculs le facteur d’amélioration QI du facteur Q défini comme le rapport entre le facteur Q du signal régénéré et le facteur Q du signal non régénéré, c’est-à-dire lorsque la fibre non-linéaire et le filtre # 2 sont supprimés du montage. Nous voulons attirer l’attention du lecteur sur le fait qu’une amélioration du facteur Q après le régénérateur n’implique pas une amélioration du TEB comme on pourrait le penser d’après la relation 1.9 qui suppose que les distributions de probabilité sont gaussiennes. En effet, il a été démontré que les distributions de probabilité ne sont plus gaussiennes en sortie du régénérateur [152]. Nous reviendrons sur ce point dans le paragraphe 4.4.2.2. La figure 4.22 illustre l’amélioration du facteur Q en fonction de la puissance en entrée du régénérateur. Nous avons pu montrer théoriquement que le régénérateur de Mamyshev améliore de 2 dB au maximum le facteur Q d’un signal dégradé par le bruit d’émission spontanée des amplificateurs optiques. Cette valeur est en accord avec la valeur expérimentale de 1,5 dB rapportée par Her *et al.* [144].

Nous avons également constaté que la puissance en entrée correspondant à l’amélioration maximum du facteur Q ne correspondait pas au point de fonctionnement défini par la zone du plateau sur la fonction de transfert (également représentée sur la figure 4.22). La zone du plateau correspond en effet à une puissance crête de 1,5 W alors que la valeur maximum de QI correspond à 2W. Ce résultat théorique, qui peut paraître surprenant au premier abord, a été confirmé par les résultats expérimentaux de la référence [153]. Nous expliquerons ce phénomène dans un prochain paragraphe.

Notre approche nous a également permis d’étudier le rôle du filtre d’entrée sur les performances du régénérateur. D’après la figure 4.21.b, on observe clairement que le filtre en entrée sert à éliminer le bruit dans la bande spectrale du filtre décalé de sortie.

Notons que ce filtre n’existe pas dans le schéma du régénérateur original proposé par Mamyshev [12]. En effet, pour décrire le principe théorique du régénérateur, Mamyshev, et

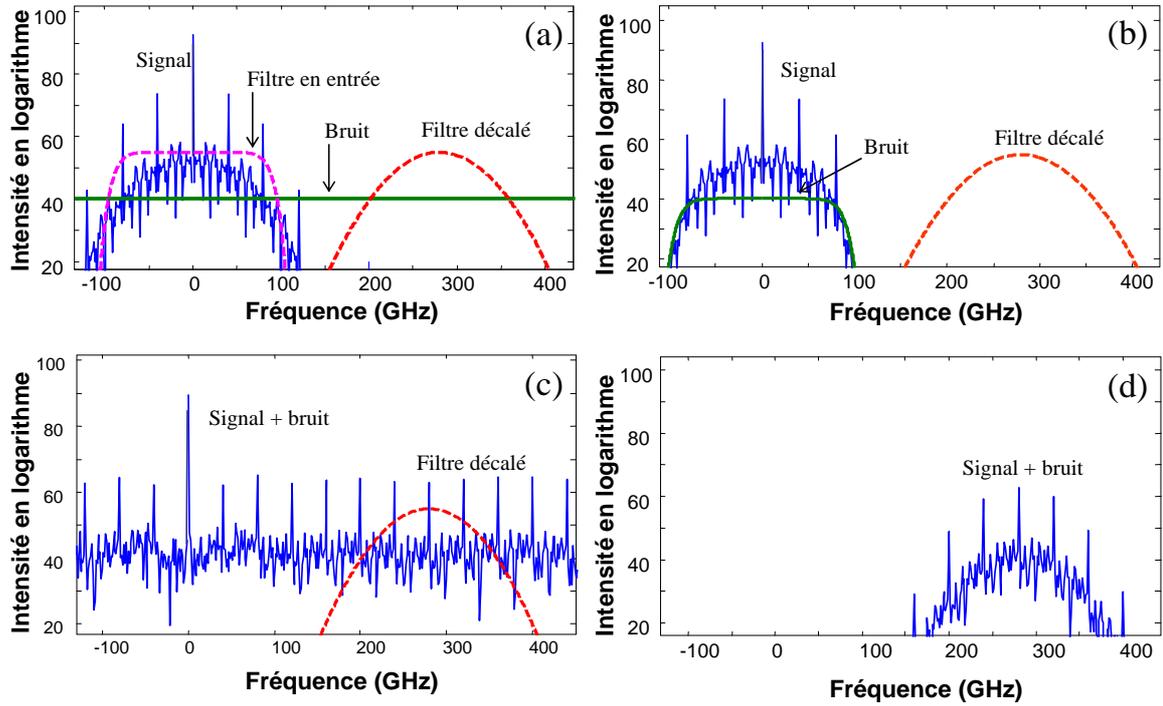


FIG. 4.21 – Différents spectres du signal et du bruit à différents endroits du régénérateur de Mamyshev pour un débit de 40 Gbit/s : (a) en entrée du filtre flat-top, (b) en sortie du filtre flat-top, (c) en sortie de la fibre non-linéaire et (d) en sortie du filtre décalé.

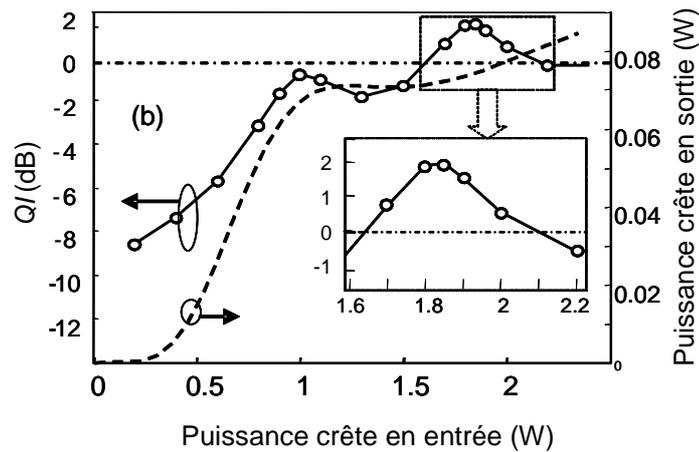


FIG. 4.22 – Evolution de QI en fonction de la puissance crête en entrée du régénérateur de Mamyshev (ligne continue) et FdT du régénérateur (pointillés) pour un débit de 40 Gbit/s.

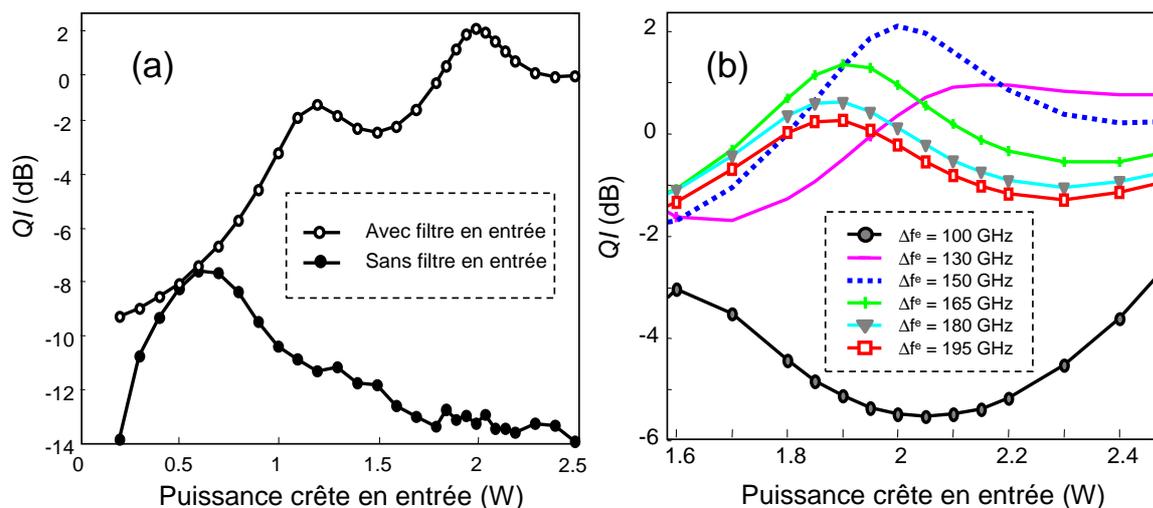


FIG. 4.23 – (a) Evolution de QI en fonction de la puissance crête en présence (points blancs) et en absence (points noirs) du filtre. (b) Evolution de QI en fonction de la puissance crête pour différentes largeurs spectrales du filtre en entrée.

d'autres auteurs par la suite, proposent une approche "fonction de transfert" où le bruit est pris en compte par le changement de puissance d'une impulsion unique. Dans ce cas, l'efficacité du régénérateur est démontrée par la présence du plateau sur la FdT, ce qui ne dépend pas de la présence d'un filtre en entrée. Dans le cas d'une étude plus orientée "système", où la source de bruit est en général l'émission spontanée large bande des amplificateurs optiques, la présence du filtre en entrée devient obligatoire. Nous avons vérifié que, dans la plupart des démonstrations expérimentales du régénérateur de Mamyshev de la littérature, une fonction de filtrage en entrée du régénérateur était présente.

La figure 4.23.a présente l'amélioration du facteur Q en fonction de la puissance du signal dans le cas où l'on utilise un filtre en entrée et dans le cas où l'on enlève ce filtre. Le filtre utilisé a une forme "flat-top" avec une largeur spectrale de 150 GHz (1,1 nm) ce qui permet de filtrer le bruit tout en conservant le spectre du signal en entrée. Nous constatons que l'absence du filtre ne permet pas de régénérer le signal mais le dégrade au contraire. Ce point a été vérifié expérimentalement par les travaux de Yang *et al.* [154].

La figure 4.23.b présente différentes évolutions de l'amélioration du facteur Q en fonction de la puissance du signal pour différentes valeurs de la largeur spectrale Δf^e du filtre en entrée. La largeur spectrale du filtre d'entrée qui améliore au mieux les performances du régénérateur est de $\Delta f^e = 150$ GHz dans notre cas.

Enfin, d'autres simulations numériques, réalisées avec différentes valeurs de paramètres, nous ont permis de confirmer le point très important suivant. Les paramètres du régénérateur de Mamyshev, conduisant à une FdT de type B, sont également les paramètres qui conduisent à la meilleure amélioration du facteur Q .

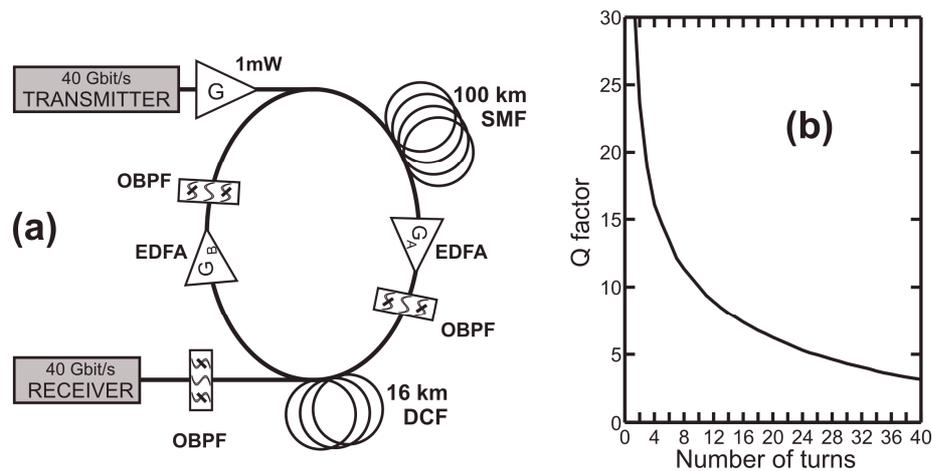


FIG. 4.24 – (a) Boucle à recirculation avec 100 km de fibre SMF et 16 km de fibre DCF. (b) Facteur Q en fonction du nombre de tours, d'après [14].

4.2.2.2 Dégradation du signal au cours de la transmission

Dans le cadre d'une collaboration avec l'ICB de Dijon, nous avons cherché à comparer nos résultats de simulation concernant l'étude des performances du régénérateur de Mamyshev avec ceux obtenus par l'ICB. Le régénérateur ayant servi à la comparaison avait une structure très proche de celle étudiée précédemment. Le débit est de 40 Gbit/s et le rapport cyclique de 25 %.

Nos collègues de Dijon utilisent le logiciel commercial de transmission optique VPI pour effectuer leurs simulations. Pour dégrader le signal, ils simulent une boucle à recirculation qui comprend de la fibre de transmission, de la fibre à compensation de dispersion, des EDFA, etc.

La figure 4.24.a décrit la boucle à recirculation avec 100 km de fibre SMF et 16 km de fibre DCF en supposant que la fibre DCF compense à la fois la dispersion et la pente de la dispersion. Le bruit introduit par les EDFA est la cause principale de dégradation du signal. L'évolution du facteur Q en fonction du nombre de tours dans la boucle à recirculation est présentée sur la figure 4.24.b.

Pour qualifier le régénérateur de Mamyshev, le paramètre QI (l'amélioration du facteur Q) a été tracé en fonction de la puissance en entrée du régénérateur qui avait été inséré devant le récepteur. La figure 4.25 présente l'évolution de l'amélioration du facteur Q par le régénérateur de Mamyshev en fonction de la puissance en entrée pour trois valeurs de facteur Q en entrée, obtenue par l'ICB.

Nous constatons que l'ICB obtient des résultats similaires aux nôtres, c'est-à-dire que le point de fonctionnement pour les "1" ne correspond pas au plateau de la fonction de transfert. Il est décalé significativement vers les plus hautes puissances sauf pour le cas où le signal en entrée est très dégradé ($Q = 3,3$).

La valeur d'amélioration du facteur Q , plus élevée que dans notre cas, s'explique par

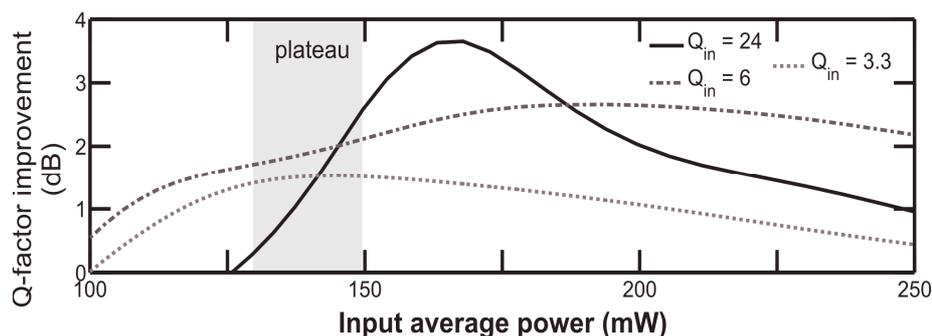


FIG. 4.25 – Evolution de QI en fonction de la puissance en entrée du régénérateur de Mamyshev pour différentes qualités du signal pour un débit de 40 Gbit/s, d'après [14].

le fait que la configuration du régénérateur est légèrement différente du cas précédent (elle comprend 3,5 km de fibre non-linéaire au lieu de 2,5 km dans le cas précédent).

4.2.3 Explication pour le décalage du point de fonctionnement

Jusqu'à maintenant nous avons présenté deux approches pour étudier le régénérateur de Mamyshev : l'approche "fonction de transfert" et l'approche "amélioration du facteur Q ". La première approche permet de déterminer un jeu de paramètres pour la conception d'un régénérateur optimal et la deuxième approche permet de quantifier les performances du régénérateur en terme d'amélioration de la qualité du signal. Ces deux approches sont complémentaires mais elle diffèrent sur un point : la détermination de la puissance de travail du régénérateur. Il nous faut maintenant expliquer ce désaccord.

4.2.3.1 Cas d'une impulsion unique

Alors qu'il réduit efficacement le bruit d'amplitude (ou gigue d'amplitude), le régénérateur de Mamyshev introduit une gigue temporelle. En effet, en raison du principe même de l'automodulation de phase, des impulsions de puissances crêtes différentes ne se trouvent pas extraites au même instant du régénérateur, conduisant alors, comme illustré sur la figure 4.26, à un décalage temporel ΔT . La gigue temporelle correspond à l'amplitude du décalage relatif pour des variations de puissance crête des impulsions. La gigue temporelle dégrade la qualité du signal à la détection et affecte le facteur Q du signal.

Sur la figure 4.27.a, nous avons tracé ce décalage $\Delta T/\tau_e$, référencé par rapport à une impulsion initiale et normalisé par la durée à mi-hauteur τ_e de l'impulsion initiale, en fonction de la puissance crête en entrée [155]. Les paramètres de simulation sont identiques à ceux dans la figure 4.22. Nous remarquons que, dans la zone correspondant au plateau de la fonction de transfert (zone 1), les variations de $\Delta T/\tau_e$ sont importantes, impliquant une gigue temporelle pouvant aller jusqu'à 20 % de τ_e . Par contre, pour des puissances plus élevées, dans une zone quasiment linéaire de la fonction de transfert (zone 2), les variations de $\Delta T/\tau_e$ sont quasi-nulles, impliquant une gigue temporelle quasi inexistante. Le point de

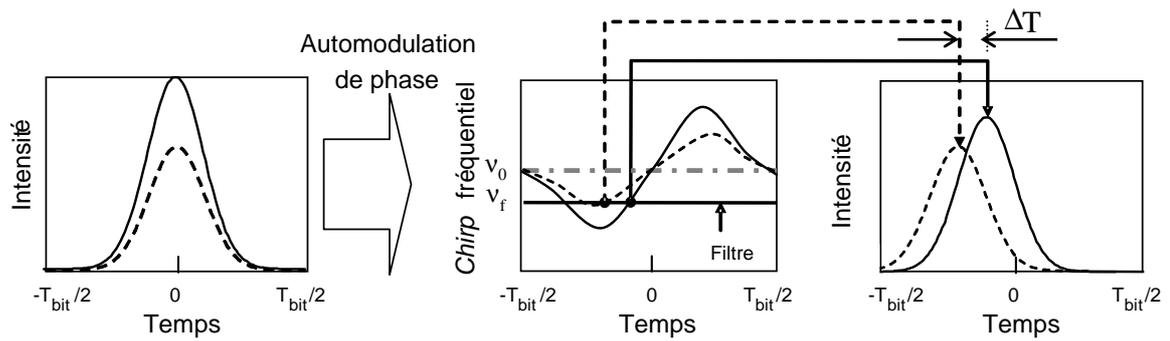


FIG. 4.26 – Illustration du décalage temporel induit par automodulation de phase entre deux impulsions de puissance crête différente.

fonctionnement pour la puissance crête des symboles "1" doit donc être un compromis entre un point de fonctionnement dans la zone 1 où le bruit d'amplitude est réduit et un point de fonctionnement dans la zone 2 où la gigue temporelle introduite par le régénérateur est minimale.

En raison de son caractère unique, permettant de quantifier les dégradations d'un signal dues aux variations d'amplitude et à la gigue temporelle, le facteur Q est un bon indicateur des performances du régénérateur. Les figures 4.22 et 4.25 nous indiquent effectivement que le point de fonctionnement optimal se situe dans la zone intermédiaire entre la zone 1 et la zone 2. L'amélioration maximale du facteur Q ne coïncide donc pas avec la zone du plateau de la FdT.

La figure 4.27.b représente l'évolution de la durée à mi-hauteur τ_s de l'impulsion de sortie (normalisée par rapport à τ_e) en fonction de la puissance crête en entrée. La zone où a lieu l'amélioration maximum du facteur Q correspond également à la zone qui préserve au mieux les durées d'impulsions.

Dans ce paragraphe, nous avons étudié la propagation d'une impulsion unique dans le régénérateur et montré la prédominance de la gigue temporelle dans la zone du plateau. Examinons maintenant le cas d'un train d'impulsions se propageant dans le régénérateur.

4.2.3.2 Cas d'un train d'impulsions de séquence aléatoire

Généralement, une fonction de transfert est une courbe représentant la puissance crête d'une impulsion en sortie en fonction de la puissance crête d'une impulsion en entrée avec une durée temporelle fixée. Dans la réalité, à cause de la dispersion, des effets non-linéaires et des interactions entre impulsions, la durée des impulsions varie d'une impulsion à l'autre dans un train d'impulsions.

La figure 4.28 montre la variation de la durée et de la puissance crête des impulsions dans un train de 1024 impulsions, pour une puissance moyenne de 1 mW, après une transmission sur 30 tours dans la boucle à recirculation décrite dans figure 4.24. Cette propagation est simulée par nos propres codes. Toutes les impulsions injectées au départ sont au même

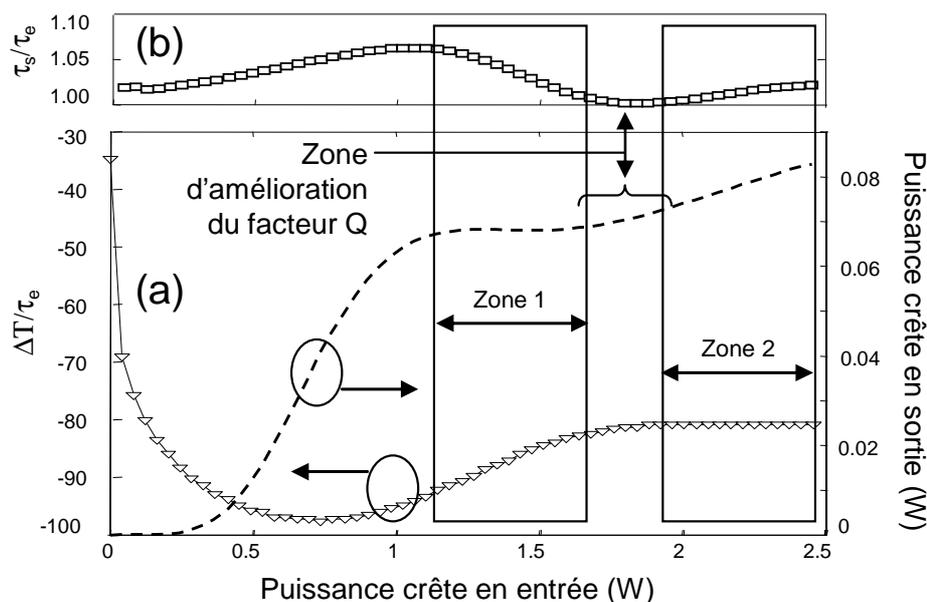


FIG. 4.27 – (a) Evolution de l'écart temporel $\Delta T/\tau_e$ et (b) évolution de la durée τ_s/τ_e de l'impulsion de sortie en fonction de la puissance crête en entrée.

niveau de puissance (7,2 mW) et ont la même durée (6,25 ps).

Nous constatons une dispersion des valeurs de durée des impulsions et de puissance crête des impulsions. Toutefois, plutôt que de s'organiser de manière complètement aléatoire, nous remarquons que cette dispersion va dans le sens d'une préférence pour la conservation de l'énergie des impulsions. En effet, une réduction de la durée des impulsions s'accompagne préférentiellement d'une augmentation de leur puissance crête.

Dans une expérience de régénération de type Mamyshev, le changement de durée d'impulsions implique une modification de la fonction de transfert du régénérateur, conformément à nos études présentées au paragraphe 4.2.1.1. La figure 4.29 présente trois FdT correspondant à trois largeurs temporelles à mi-hauteur différentes : $0,8 \times T_{FWHM}$, T_{FWHM} et $1,2 \times T_{FWHM}$. Les paramètres du régénérateur sont identiques à ceux de la figure 4.22. Nous considérerons que, pour chacune de ces trois durées d'impulsion, l'énergie des impulsions ne change pas. C'est la raison pour laquelle nous avons tracé les FdT en fonction de la puissance moyenne et non de la puissance crête.

Le point intéressant est la présence d'une zone de puissances moyennes pour lesquelles les variations de largeurs d'impulsions induisent une moindre variation de puissance de sortie. Cette fois encore, cette zone ne coïncide pas avec la zone du plateau mais correspond à des puissances légèrement supérieures.

Au cours des paragraphes précédents, nous avons proposé deux effets qui expliquent le désaccord entre les valeurs du point de fonctionnement obtenues au moyen de l'approche FdT et de l'approche facteur Q . Le premier, dû à la gigue temporelle, est intrinsèque au régénérateur de Mamyshev. Le deuxième, dû aux variations de durées d'impulsions, est lié

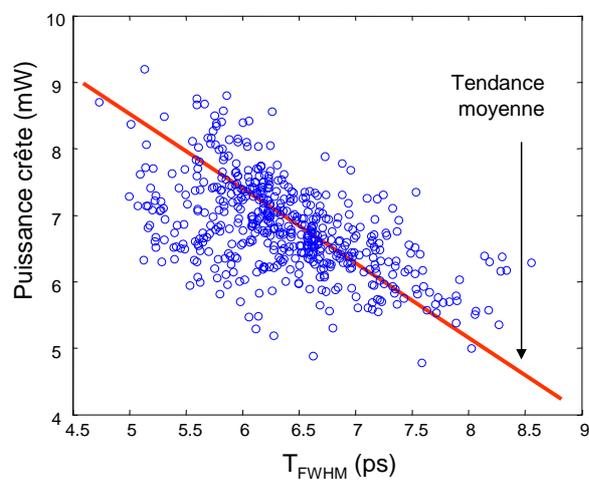


FIG. 4.28 – Variation de la durée et de la puissance crête des impulsions pour un débit de 40 Gbit/s après une transmission sur 3000 km.

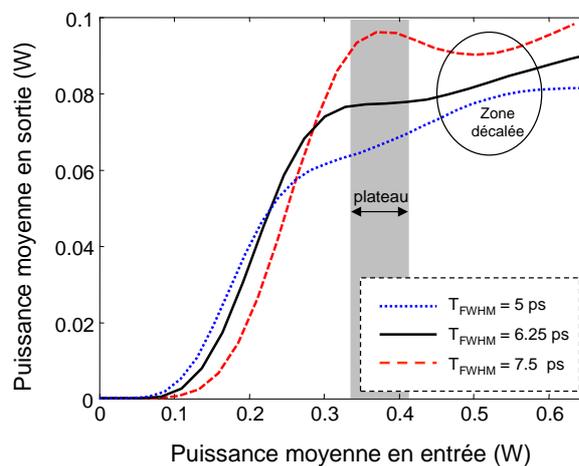


FIG. 4.29 – Evolution de la puissance moyenne du signal en sortie en fonction de la puissance du signal en entrée du régénérateur pour un débit de 40 Gbit/s avec différentes valeurs de largeur temporelle des impulsions en entrée.

à la dégradation du signal au cours de la propagation.

Au cours de ces études, nous avons pointé du doigt le rôle négatif de la gigue temporelle introduit par le régénérateur lui-même. Nous allons maintenant proposer une architecture de régénérateur double-étage visant à la réduire.

4.2.4 Proposition d'une structure à double-étage limitant la gigue temporelle et conservant la longueur d'onde du signal

Un régénérateur idéal doit réduire le bruit d'un signal dégradé tout en conservant les caractéristiques du signal, en particulier les durées d'impulsions et la longueur d'onde. Or, le régénérateur de Mamyshev, parce qu'il nécessite un filtre optique décalé, provoque une conversion de longueur d'onde. Pour pallier cet inconvénient, Mamyshev a proposé de mettre en cascade deux régénérateurs identiques (mais de décalages opposés) pour revenir à la longueur d'onde initiale. Cette solution offre en plus l'avantage d'être plus efficace en termes de réduction du bruit.

Dans une configuration à double étage, en accord avec les études précédentes, il paraît logique que le deuxième régénérateur soit de type B afin de réduire au mieux le bruit en sortie du régénérateur. Cependant, comme nous venons de le voir, le régénérateur de type B introduit une gigue temporelle additionnelle. Concernant le premier étage du régénérateur complet, il nous a semblé judicieux de nous poser la question de savoir quelle devrait être sa fonction de transfert optimale (types A, B ou C?). L'idée sous-jacente est de réduire la gigue temporelle intrinsèque du régénérateur.

Si l'on reprend l'analyse théorique de la gigue temporelle introduite par le régénérateur de type B, présentée au paragraphe 4.2.3.1, nous constatons que :

- Ce sont les variations de puissance des impulsions qui introduisent la gigue temporelle,
- Le signe du décalage ΔT entre deux impulsions de puissances différentes dépend du sens du décalage du filtre de sortie.

Par conséquent, deux régénérateurs en cascade, dont les décalages de filtres sont de signe opposé, peuvent potentiellement annuler la gigue temporelle du dispositif complet, à condition que le premier régénérateur conserve une gigue d'amplitude convenablement choisie. Notre étude théorique a montré que l'utilisation d'un régénérateur de type C, en tant que premier étage d'un régénérateur double-étage, permet de remplir cette fonction [156].

La configuration double-étage, qui permet de limiter la gigue introduite par le régénérateur, est présentée sur la figure 4.30.a. Des impulsions synchronisées correspondant à des "1" et des "0" de différents niveaux sont envoyées dans la première fibre (figure 4.30.b). Le régénérateur No.1 est utilisé autour d'un point de fonctionnement qui n'élimine pas complètement le bruit sur les "1". Sa fonction de transfert est de type C. On remarque que les impulsions ne sortent pas synchronisées du régénérateur (figure 4.30.c). En raison du sens du décalage du filtre, les impulsions les plus puissantes sont en avance sur les impulsions les moins intenses. Le régénérateur No.2, utilisé avec un filtre qui recentre le signal autour de

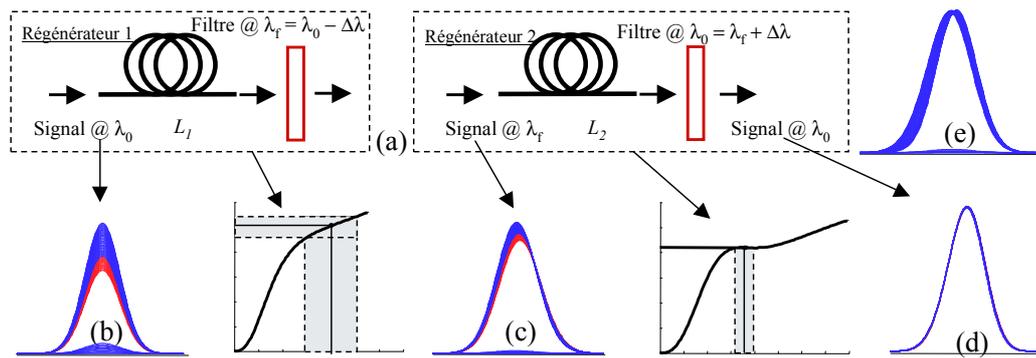


FIG. 4.30 – Double étage asymétrique de régénérateurs pour diminuer la gigue temporelle : (a) Configuration, (b) diagramme de l'œil du signal en entrée du régénérateur 1, (c) diagramme de l'œil du signal en sortie du régénérateur 1 (de type C) ainsi qu'en entrée du régénérateur 2, (d) diagramme de l'œil du signal en sortie du régénérateur 2 et (e) diagramme de l'œil du signal en sortie d'un régénérateur simple étage de type B pour un débit de 40 Gbit/s.

ν_0 , a pour effet de réduire le bruit d'amplitude et de re-synchroniser les impulsions (figure 4.30(d)).

Les simulations précédentes ont été réalisées avec deux fibres microstructurées en verre de chalcogénure de longueurs 6 m et 3 m en supposant les paramètres suivants : $\alpha = 1$ dB/m, $D = -700$ ps/nm/km, $\gamma = 15\,000$ W⁻¹km⁻¹. Cette solution nécessite un amplificateur optique possédant un gain de 14,5 dB entre les deux régénérateurs. La figure 4.30.e montre, à titre de comparaison, le signal de sortie d'un régénérateur simple étage. Nous confirmons ainsi que notre proposition permet théoriquement de limiter la gigue introduite par le régénérateur de Mamyshev.

Nous profitons de cette étude pour insister sur le fait que les simulations précédentes ont été réalisées avec une fibre microstructurée en verre de chalcogénure de type As₂Se₃. Nous confirmons ainsi la forte potentialité de ces fibres, dans la mesure où, par exemple, des pertes de 1 dB/m soient possibles. Si, comme nous l'avons vu au chapitre 3, les pertes de ces fibres sont actuellement plutôt de l'ordre de 10 dB/m, il semblerait que l'objectif de 1 dB/m soit parfaitement réalisable par nos collègues de PERFOS et de l'EVC. Enfin, nous voulons faire remarquer que les fortes valeurs de pertes (1 dB/m) et de dispersion (-700 ps/nm/km) ne sont pas du tout rédhibitoires pour la réalisation de dispositifs de régénération dans la mesure où une courte longueur de fibre est utilisée. Cette conclusion est en réalité déjà observable sur notre abaque de la figure 4.19.

4.2.5 Bilan de l'étude théorique

L'étude théorique du régénérateur de Mamyshev que nous avons entreprise au commencement de ma thèse avait pour but de maîtriser la conception de régénérateurs en vue d'utiliser de nouvelles fibres fortement non-linéaires. Cette mission est accomplie puisque

| Fibre | L (m) | α (dB/km) | γ (W ⁻¹ km ⁻¹) | D à 1550 nm (ps/nm/km) | S (ps/nm ² /km) |
|----------|-------------|---------------------|---|-----------------------------|---------------------------------|
| DSF | quelques km | 0,25 | 2,6 | 0,15 | 0,07 |
| HF96 | 200 | 12 | 38,5 | -20 | -0,05 |
| FMC 2S1G | 1,7 | 5 500 | 500 | -700 | - |

TAB. 4.2 – Caractéristiques des fibres non-linéaires disponibles au laboratoire.

nous avons établi un abaque permettant, d'une manière simple, d'identifier les fibres présentant un potentiel pour la régénération de type Mamyshev.

Les études théoriques se sont également poursuivies et ont permis d'obtenir des résultats originaux notamment en utilisant une approche permettant d'évaluer l'amélioration du facteur de qualité du signal.

Nous allons maintenant nous intéresser aux caractérisations expérimentales du régénérateur de Mamyshev et commencerons par la configuration simple-étage.

4.3 Etude expérimentale du régénérateur simple étage

Dans ce paragraphe, nous allons présenter les résultats expérimentaux concernant le régénérateur de Mamyshev dans sa configuration la plus simple, c'est-à-dire la configuration simple-étage. Le dimensionnement du régénérateur s'effectue conformément aux études théoriques précédentes. Cependant un certain nombre de paramètres sont imposés par les composants disponibles au laboratoire. Nous commencerons ce paragraphe par décrire brièvement les outils expérimentaux disponibles au laboratoire.

4.3.1 Les outils expérimentaux disponibles

Trois types de fibres non-linéaires sont disponibles au laboratoire pour nos études : une fibre DSF standard, une fibre FMS fabriquée par PERFOS et une fibre FMC fabriquée par PERFOS et l'EVC. Le tableau 4.2 résume leurs caractéristiques.

Comme nous l'avons vu précédemment, le régénérateur de Mamyshev nécessite deux types de filtres optiques :

- Les filtres flat-top : nous disposons de filtres de largeur spectrale à 3 dB accordables de 0,28 nm à 6 nm.
- Les filtres gaussiens : nous disposons de quatre filtres de largeur spectrale à 3 dB de 0,27 nm, 0,41 nm, 0,51 nm et 0,76 nm avec des pertes d'insertion de 4,5 dB, 3 dB, 1,5 dB et 1,5 dB respectivement. Les rapports entre la largeur à 3 dB et la largeur à 20 dB pour ces quatre filtres sont : 0,27, 0,32, 0,3 et 0,28 respectivement tandis que ce rapport, pour une forme gaussienne idéale, est de 0,37.

Pour commencer l'étude expérimentale du régénérateur de Mamyshev, nous avons effectué des mesures de FdT pour différentes fibres. Ces mesures constituent les premières caractérisations importantes pour l'étude de tout régénérateur.

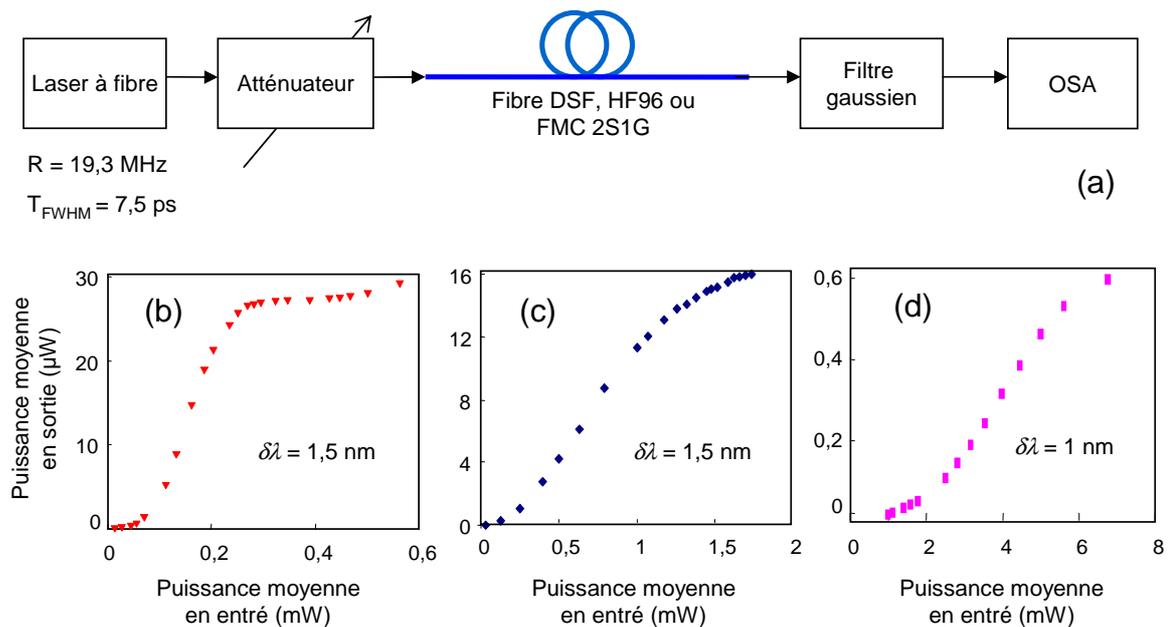


FIG. 4.31 – (a) Schéma du montage de la mesure des FdT au moyen de la source à modes bloqués. FdT obtenues avec : (b) 3 km de fibre DSF, (c) 200 m de fibre HF96 et (d) 1,7 m de fibre FMC 2S1G.

4.3.2 Mesure de fonctions de transfert avec la source à modes bloqués

Le montage expérimental est représenté sur la figure 4.31.a. La source est un laser à fibre à modes bloqués dont le taux de répétition est de 19,3 MHz. Avec une puissance moyenne maximum de 10 mW et des impulsions de l'ordre de 10 ps, cette source permet d'atteindre des puissances crêtes jusqu'à 50 W. A la sortie du régénérateur, nous avons utilisé un analyseur de spectre (OSA) pour mesurer la puissance moyenne du signal.

Trois mesures ont été effectuées pour les trois types de fibres mentionnés précédemment : 3 km de DSF, 200 m de fibre FMS HF96 et 1,7 m de fibre FMC 2S1G. Pour le régénérateur constitué de la fibre DSF, des impulsions de 7,5 ps ont été utilisées. Le filtre en sortie, avec une largeur spectrale à 3 dB de 0,51 nm, est décalé de 1,5 nm. Pour le régénérateur constitué de la fibre FMS HF96, des impulsions de plus longue durée sont nécessaires pour obtenir une FdT de type B. Dans ce cas, nous avons utilisé des impulsions d'environ 12 ps, obtenues en filtrant la source impulsionnelle. Le filtre en sortie, avec une largeur spectrale à 3 dB de 0,27 nm, est décalé de 1,5 nm. En ce qui concerne le régénérateur constitué de la fibre FMC 2S1G, des impulsions de 7,5 ps ont été utilisées. Le filtre en sortie, avec une largeur spectrale à 3 dB de 0,27 nm, est décalé de 1 nm.

Les figures 4.31.b, 4.31.c et 4.31.d montrent les FdT obtenues.

Avec la fibre DSF (figure 4.31.b), nous obtenons bien une FdT de type B présentant un plateau pour des puissances crêtes compatibles avec les signaux haut débit à 40 Gbit/s (de 0,7 W à 1,5 W). Par contre pour les fibres FMS et FMC (figures 4.31.c et 4.31.d respectivement), la zone du plateau n'est pas atteinte, même pour des puissances crête aussi

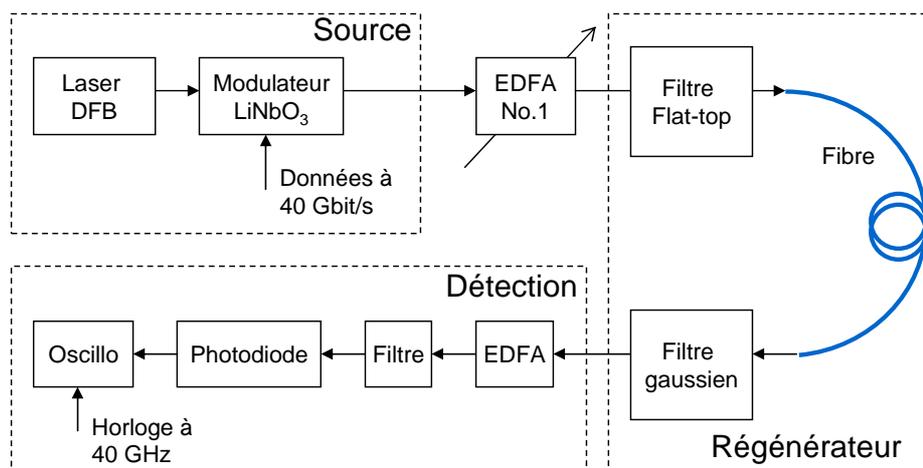


FIG. 4.32 – Montage de mesure de la fonction de transfert du régénérateur de Mamyshev à 40 Gbit/s.

élevées que 3,5 W et 20 W respectivement.

En conclusion, en l'état actuel d'avancement des travaux concernant d'élaboration de nouvelles fibres optiques fortement non-linéaires en verre de silice ou de chalcogénure, nous ne pouvons pas faire la démonstration de l'utilisation de ces fibres pour des applications de régénération optique. Des progrès doivent notamment encore être réalisés au niveau de la diminution de la valeur de la dispersion des fibres FMS et de la diminution de la valeur des pertes dans les fibres FMC. Ces travaux sont actuellement en cours dans le cadre du projet ANR FUTUR auxquels mes travaux de thèse contribuent activement.

Plusieurs autres FdT de régénérateurs conçus à partir de fibre DSF ont été mesurées en modifiant certains paramètres tels que la longueur de la fibre, la largeur du filtre en sortie, la dispersion, le décalage du filtre, etc. Ces FdT ont pour la plupart été présentées au paragraphe 4.2.1.1. Nous ne les représenterons pas ici.

4.3.3 Mesure de fonctions de transfert avec la source à haut débit : observation de l'effet Brillouin

Pour nous assurer que les FdT restaient valables avec la source à haut débit que nous utiliserons lors des caractérisations en boucle à recirculation (voir paragraphe 4.4), nous avons réalisé le montage de la figure 4.32. La source est un laser DFB modulé à 40 Gbit/s et de format RZ 33% ($T_{FWHM} = 8$ ps). Nous mesurons la puissance des impulsions en sortie sur l'oscilloscope à échantillonnage.

En jouant sur la puissance à la sortie de l'EDFA No. 1, nous avons pu régler la puissance moyenne en entrée de la fibre jusqu'à 30 dBm. A la détection, nous traçons la tension crête d'une impulsion dite "isolée", c'est-à-dire une impulsion représentant un symbole "1" entourée de symboles "0".

Les paramètres du régénérateur pour lequel nous avons mesuré la FdT sont les suivants :

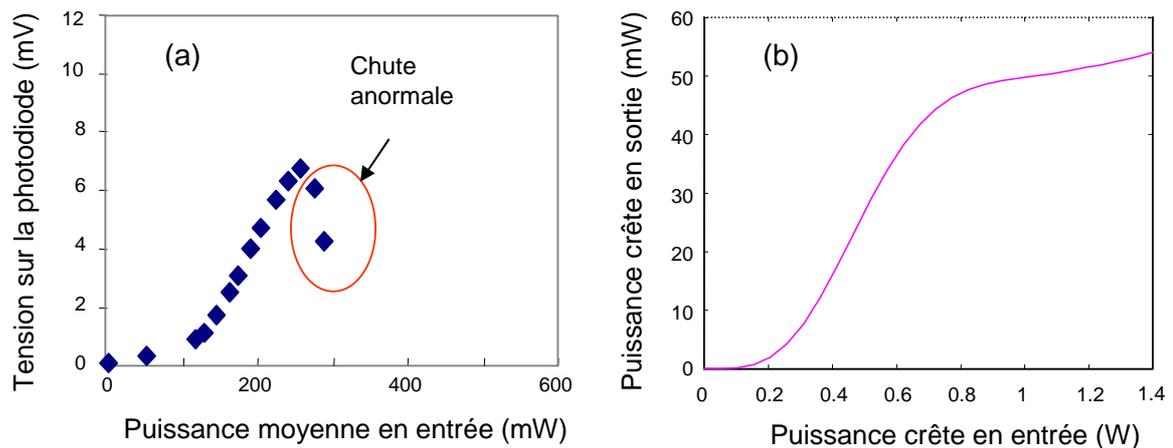


FIG. 4.33 – (a) FdT du régénérateur présentant une chute anormale de puissance et (b) FdT théorique pour un débit de 40 Gbit/s.

- $T_{FWHM} = 8$ ps à 1541 nm,
- Fibre DSF, $L = 9$ km,
- $D = -0,5$ ps/nm/km à 1541 nm,
- Filtre gaussien de largeur spectrale égale à 0,41 nm.

Au cours de cette mesure, nous avons rencontré un phénomène d'instabilité sur la mesure de la tension à l'oscilloscope au delà d'une certaine puissance en entrée. La figure 4.33.a illustre une chute anormale de la puissance en sortie du régénérateur alors que la forme de la FdT devrait être similaire à la simulation présentée sur la figure 4.33.b. Nous avons supposé qu'une grande partie de la puissance du signal a été réfléchié par effet Brillouin.

Pour confirmer notre hypothèse, nous avons effectué des mesures de la puissance réfléchié sur les 9 km de fibre utilisée dans cette expérience. Le signal est couplé dans la fibre par le port 95% d'un coupleur (voir figure 4.34.a). Le port 5% est connecté à un puissance-mètre de haute sensibilité.

La courbe représentant la puissance moyenne réfléchié en fonction de la puissance moyenne en entrée est représentée sur la figure 4.34.b. Elle montre une évolution non-linéaire caractéristique de l'effet Brillouin, à partir de 250 mW. L'observation du spectre du signal rétro-diffusé confirme la présence de l'effet Brillouin à travers les raies Stokes décalées de 10 GHz par rapport aux raies de modulation du signal (encart de la figure 4.34.b).

Une technique permettant de réduire le gain Brillouin dans la fibre, consiste à moduler le signal à basse fréquence. C'est ce que nous avons effectué, à une fréquence de 100 kHz, et nous avons constaté l'élimination quasi totale de la puissance retro-diffusée (figure 4.35).

L'effet Brillouin dans le régénérateur de Mamyshev a été évoqué dans la littérature dans la référence [13] mais les auteurs donnent peu de détails. Ils mentionnent juste l'utilisation d'un compresseur d'impulsions afin d'éliminer la rétrodiffusion Brillouin. Nous reviendrons sur ce point prochainement.

En supprimant l'effet Brillouin grâce à la modulation du courant du laser DFB (mo-

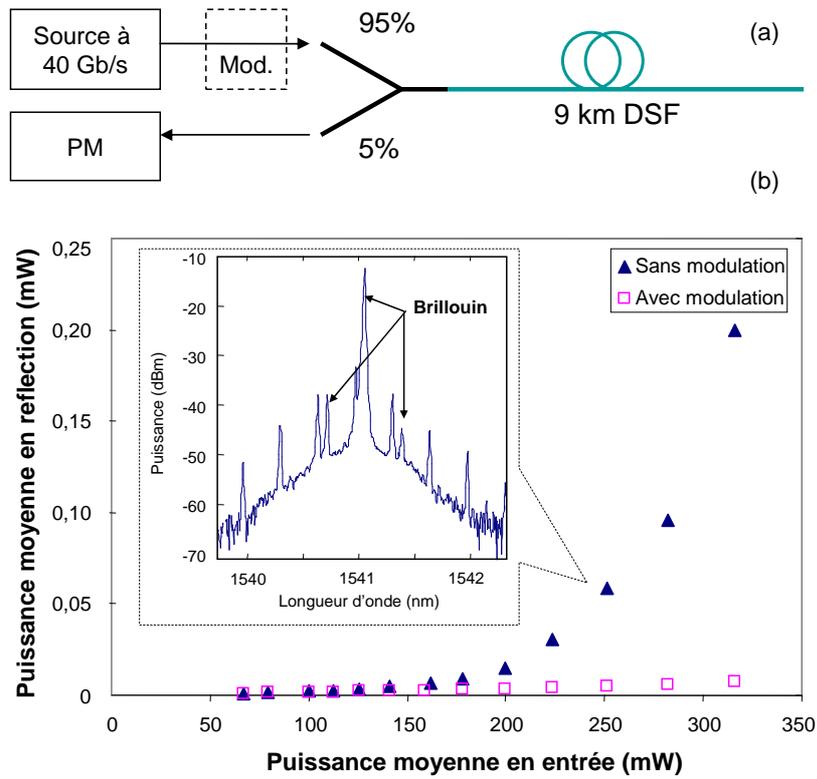


FIG. 4.34 – (a) Schéma du montage de la mesure de la puissance retro-diffusée. (b) Evolution de la puissance rétro-diffusée en fonction de la puissance en entrée et spectre du signal rétro-diffusé (encart).

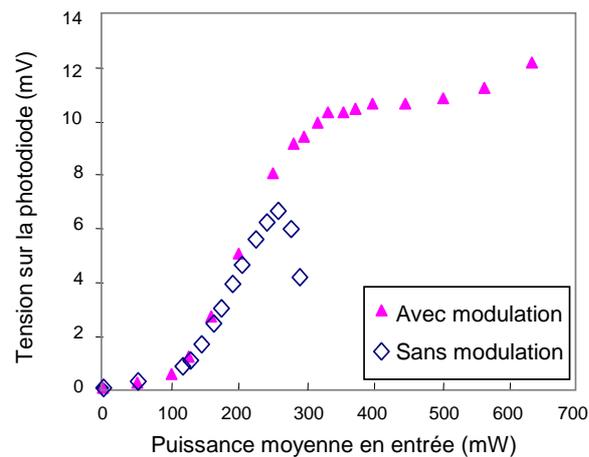


FIG. 4.35 – Mesures de la FdT avec et sans la modulation servant à supprimer l'effet Brillouin.

dulation sinusoïdale de 4% d'amplitude) à faible fréquence (150 kHz), nous avons obtenu la FdT présentée sur la figure 4.35. Elle est similaire à celle prévue par la simulation (voir figure 4.33). Cette FdT expérimentale présente un plateau horizontal (FdT de type B) ce qui signifie qu'elle est potentiellement adaptée à une expérience de régénération optique. Toutefois, la suppression de l'effet Brillouin à l'aide d'une modulation externe a mis en lumière un autre phénomène dégradant les performances du régénérateur. C'est ce que nous allons voir dans le prochain paragraphe.

4.3.4 Observation de l'effet d'interférences entre symboles

Dans l'étude que nous allons présenter dans ce paragraphe, nous avons utilisé une configuration de régénérateur similaire à celle du paragraphe précédent en utilisant une modulation à basse fréquence pour éviter l'effet Brillouin. Toutefois, à partir d'une puissance injectée de 420 mW, nous avons observé un dédoublement du diagramme de l'œil à l'oscilloscope (figure 4.36).

Ce dédoublement provient du fait qu'il existe deux niveaux moyens pour les symboles "1" en sortie du régénérateur. Ce phénomène est clairement visible sur l'extrait de séquence représenté sur la figure 4.37.a. Notons que la puissance de 420 mW est la puissance qui correspond au milieu de la zone de plateau de la FdT de la figure 4.35 mais signalons que cet effet est observé sur une large gamme de valeurs de puissance en entrée, de 350 mW à 550 mW typiquement.

En regardant plus attentivement la séquence de la figure 4.37.a, nous constatons que le niveau le plus bas des "1" concerne les impulsions isolées ainsi que la dernière impulsion d'un train d'impulsions consécutives ; le niveau le plus haut concerne les impulsions d'un train d'impulsions consécutives (sauf la dernière impulsion). Ce phénomène est reproduit par la simulation dans les mêmes conditions (figure 4.37.b).

Cette dépendance entre la puissance des impulsions et le motif de la séquence est expliqué

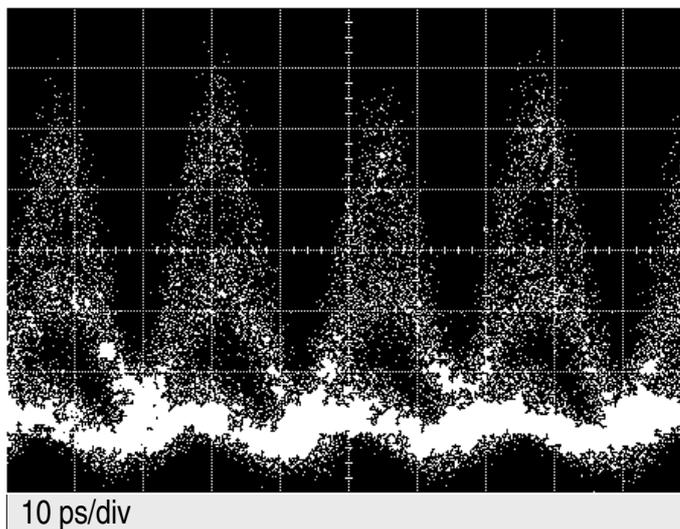


FIG. 4.36 – Dédoublage du diagramme de l'œil pour un débit de 40 Gbit/s.

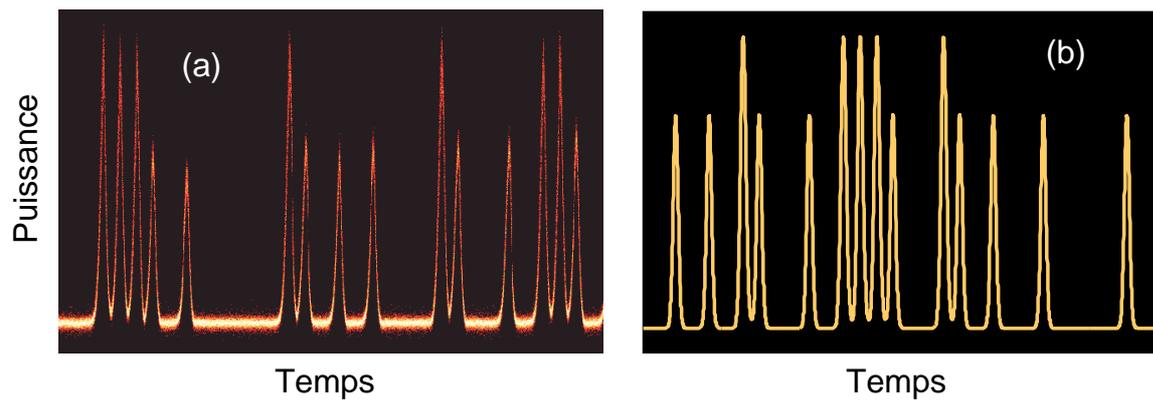


FIG. 4.37 – Extrait d'une séquence de signal en sortie du régénérateur obtenue expérimentalement (a) et en simulation (b).

par l'effet de mélange à quatre ondes intra-canal (ou IFWM pour Intrachannel Four-Wave Mixing) [157]. L'interaction entre impulsions voisines produit des fluctuations d'amplitude. Cet effet apparaît dans les systèmes de transmission à haut débit. Il peut créer des impulsions fantômes sur les "0" et créer une variation de puissance sur les "1" dans un train d'impulsions consécutives [157]. Les paramètres utilisés dans notre montage correspondent à la condition d'apparition de cet effet également évoqué par Her *et al.* dans la référence [144] : $L = 9$ km, $L_D \approx 41,4$ km et $N \approx 10,7$. Dans le paragraphe suivant, nous présentons notre solution pour éviter cet effet.

4.3.5 Solution pour éviter l'effet d'interférences entre symboles

Pour éliminer l'effet d'interférences entre symboles dans le régénérateur de Mamyshev, nous avons pensé à une solution consistant à utiliser moins de fibre dans le régénérateur en gardant (voire en diminuant) la valeur de la dispersion. Par conséquent, nous limitons la distance d'interaction entre impulsions voisines. Selon équation (4.2), lorsque l'on diminue L en gardant D , il faut diminuer la durée T_0 des impulsions pour avoir la même fonction de transfert de type B. Notre proposition concorde donc avec celle, proposée par Her *et al.* [144], consistant à utiliser un compresseur avant le régénérateur pour réduire la durée des impulsions avant de les injecter dans la fibre.

La figure 4.38.a illustre une configuration de régénérateur associée au compresseur décrit dans le paragraphe 4.2.1.1. La FdT de ce régénérateur est présentée sur la figure 4.38.b et la séquence d'impulsions correspondant au point de fonctionnement situé au milieu de la zone du plateau de la FdT est présentée sur la figure 4.38.c. On note que la dégradation du signal due aux interférences entre symboles est considérablement réduite [158].

En plus de réduire l'effet d'interférences entre symboles dû à l'IFWM, le compresseur a également pour rôle d'éliminer la dégradation du signal due à l'effet Brillouin, décrite au paragraphe 4.3.3. En effet, les résultats présentés sur la figure 4.38 ont été obtenus sans l'utilisation de la modulation externe basse fréquence. L'utilisation d'un compresseur pour éliminer l'effet Brillouin dans le régénérateur de Mamyshev a été mentionné pour la première fois par Raybon *et al.* dans la référence [13] mais les auteurs s'étendent peu sur le sujet. Nous avons donc entrepris une étude systématique de l'influence de la durée des impulsions sur la puissance rétro-diffusée.

La figure 4.39 présente la mesure de la puissance rétro-diffusée en fonction de la puissance en entrée de 4 km de fibre DSF pour différentes durées d'impulsions. Les résultats montrent clairement la diminution, voir l'élimination, de l'effet Brillouin pour les impulsions courtes. L'explication que nous donnons est la suivante. On remarque, d'après l'encart de la figure 4.34.b que c'est la puissance contenue dans la raie à ν_0 du spectre du signal qui est responsable de la plus grande partie de la puissance Brillouin rétro-diffusée. Pour une même puissance moyenne de signal, en compressant les impulsions, on réduit la part de la puissance contenue dans la raie continue à ν_0 par rapport à la puissance totale. On réduit ainsi l'effet

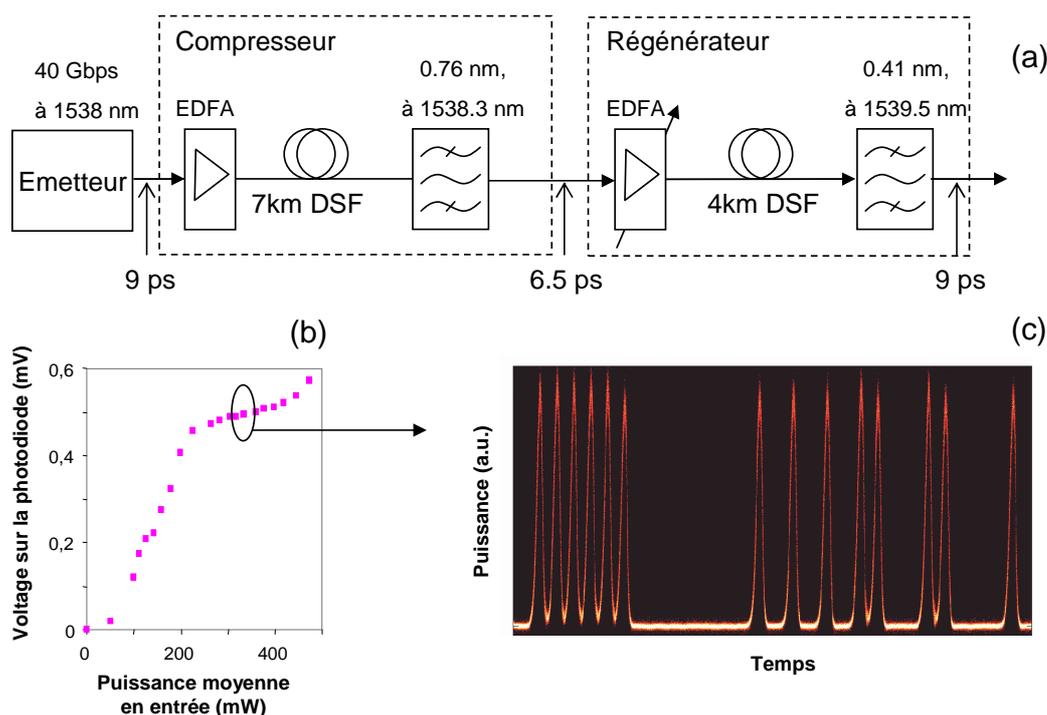


FIG. 4.38 – (a) Configuration du régénérateur associée avec un compresseur. (b) FdT du régénérateur et (c) extrait d'une séquence de signal en sortie du régénérateur obtenue expérimentalement.

Brillouin. De plus, en attaquant le régénérateur avec des impulsions de puissances crête plus élevées, on favorise l'effet Kerr qui contribue à élargir le spectre ce qui réduit encore la part de la puissance continue dans le signal. En résumé, une légère compression des impulsions (de 9 ps à 6 ps par exemple) suffit à initier un processus conduisant à l'élimination quasi complète de l'effet Brillouin.

Dans cette partie, consacré à l'étude expérimentale du régénérateur de Mamyshev simple-étage, nous avons conçu un régénérateur utilisant de la fibre DSF et avons montré qu'un compresseur d'impulsions était nécessaire lorsque l'on veut traiter un signal à 40 Gbit/s de format RZ 33%. L'utilisation d'impulsions courtes, dans le cadre de la régénération de type Mamyshev, avait déjà été évoquée dans la littérature [13, 144]. Notre contribution consiste en une démonstration claire et précise de l'intérêt de la réduction de la durée des impulsions pour éliminer l'effet Brillouin et le mélange à quatre ondes.

Le compresseur d'impulsions que nous proposons est basé sur l'effet d'élargissement spectral dû à la SPM dans une fibre et à l'utilisation d'un filtre décalé. L'analogie avec le régénérateur de Mamyshev simple-étage est frappante et c'est pourquoi nous avons eu l'idée d'utiliser le compresseur d'impulsions comme premier étage d'un régénérateur de Mamyshev double-étage. Nous obtenons ainsi un régénérateur complet, transparent à la longueur d'onde et s'affranchissant des effets non-linéaires indésirables.

Nous allons donc poursuivre notre étude du régénérateur de Mamyshev dans sa confi-

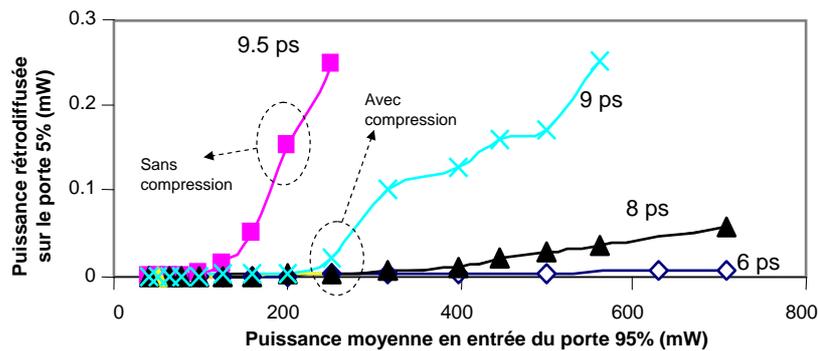


FIG. 4.39 – Puissance rétro-diffusée en fonction de la puissance moyenne du signal en entrée de 4 km de fibre DSF pour différentes durées d’impulsions.

guration double-étage.

4.4 Etude expérimentale du régénérateur double-étage

Sur la base des résultats précédents, concernant l’utilisation d’un compresseur d’impulsions devant un régénérateur de Mamyshev, nous avons proposé une nouvelle architecture de régénérateur de Mamyshev double-étage où le premier étage joue le rôle de compresseur et le deuxième étage le rôle de régénérateur.

4.4.1 Notre proposition de configuration double-étage

La figure 4.40 présente le montage du régénérateur, à base de fibre DSF, que nous avons réalisé. Le régénérateur complet inclut un compresseur et un régénérateur de Mamyshev. Le compresseur comprend 7 km de fibre DSF et un filtre gaussien de largeur 0,76 nm (à 3 dB) fixé à 1540,5 nm (décalé de 1 nm par rapport au signal à 1539,5 nm). Le régénérateur de Mamyshev inclut 4 km de fibre DSF avec une dispersion de $-0,55$ ps/nm/km à la longueur d’onde du signal, un filtre flat-top en entrée de 1,4 nm (fixé à 1540,5 nm) et un filtre gaussien en sortie de 0,41 nm (fixé à 1539,5 nm).

Le signal à 40 Gbit/s est de format RZ 33%. La durée temporelle des impulsions est d’environ 8 ps. Les impulsions sont réduites à 6 ps en sortie du compresseur. La puissance requise par le compresseur est de 100 mW. Ce signal est amplifié pour obtenir une puissance de 160 mW à l’entrée du régénérateur. Cette puissance correspond au point de fonctionnement de la FdT présentée sur la figure 4.41. Cette FdT est mesurée en fixant la puissance en entrée du compresseur et en variant la puissance à l’entrée du régénérateur. Nous remarquons que la FdT est bien de type B, donc propice à la régénération.

A la sortie du régénérateur, nous retrouvons la même largeur temporelle du signal (8 ps) et la même longueur d’onde de 1539,5 nm. La figure 4.42 illustre les spectres capturés à différents endroits du régénérateur double étage.

Par rapport à la configuration à double-étage utilisée par Raybon *et al.* [13] et néces-

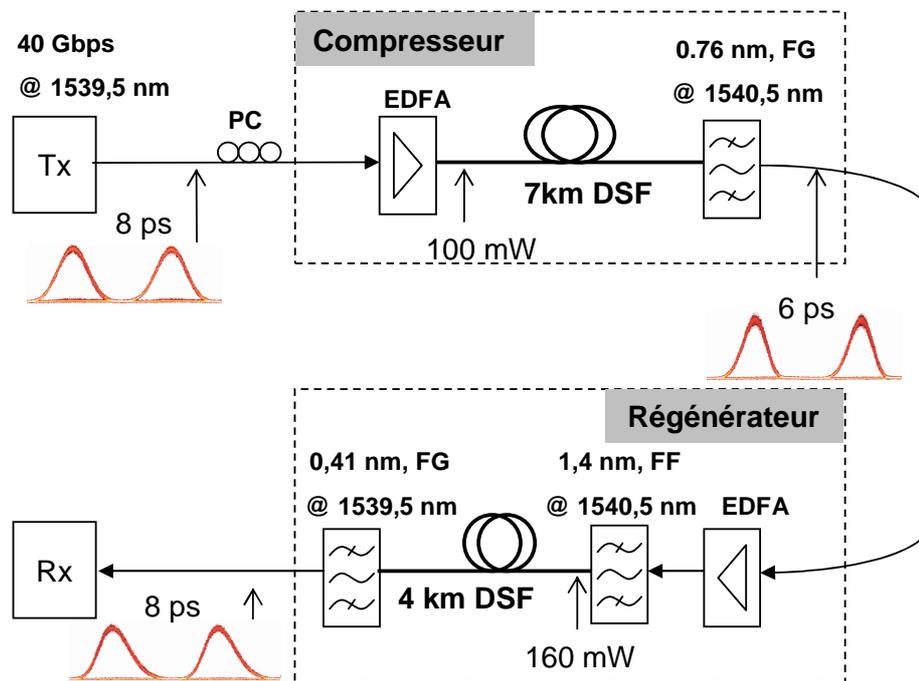


FIG. 4.40 – Montage du régénérateur double étage incluant un compresseur et un régénérateur simple étage. PC = contrôleur de polarisation, FG = filtre gaussien ; FF = Filtre flat-top.

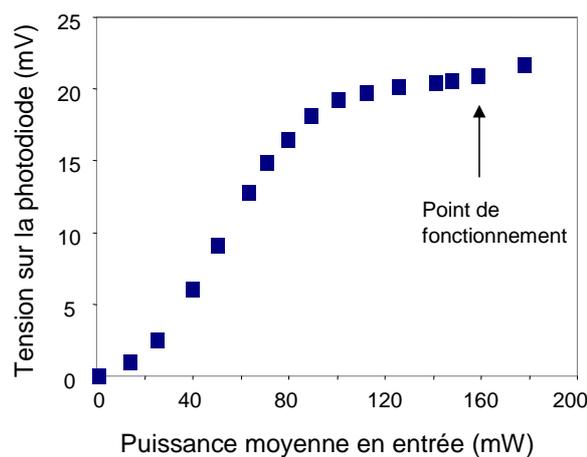


FIG. 4.41 – FdT du régénérateur pour un débit de 40 Gbit/s.

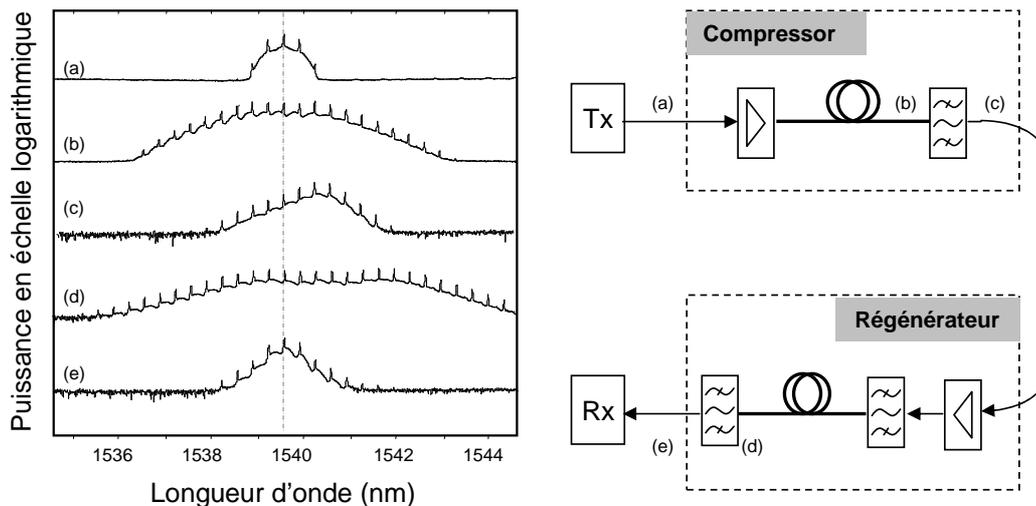


FIG. 4.42 – Spectres du signal à différents endroits du régénérateur pour un débit de 40 Gbit/s : (a) entrée du compresseur, (b) sortie de la fibre du compresseur, (c) sortie du compresseur, (d) sortie de la fibre du régénérateur et (e) sortie du régénérateur.

En ajoutant un étage supplémentaire de compression avant le régénérateur double-étage, nous économisons, grâce à notre proposition, l'emploi d'un étage de régénération tout en gardant la transparence à la longueur d'onde et en éliminant l'effet Brillouin et l'IFWM.

De plus notre configuration permet de réduire la puissance optique requise pour les deux raisons suivantes :

- Pour l'étage de compression, nous ne cherchons pas spécialement une forme en "S" pour la FdT mais seulement la compression d'impulsions sans dégradation additionnelle. Par conséquent, la puissance nécessaire pour cet étage est plus faible. En effet, on remarque, d'après les figures 4.42.b et 4.42.d, que l'élargissement spectral requis pour l'étage de compression est moins important que celui nécessaire à l'étage de régénération.
- Pour l'étage de régénération, nous économisons également un facteur 2 dB en puissance par rapport à un régénérateur normal parce que nous utilisons des impulsions de 6 ps (au lieu de 8 ps). En effet, la puissance crête plus élevée de ces impulsions favorise l'effet Kerr. D'autre part, le spectre du signal en entrée du régénérateur est pré-élargi, il requiert donc moins de puissance pour s'élargir jusque dans la bande passante du filtre.

4.4.2 Caractérisations en déployé

4.4.2.1 Le montage

La figure 4.43 illustre le montage permettant de caractériser l'efficacité du régénérateur en déployé. Le terme déployé vient du fait que nous n'effectuons qu'un seul passage dans la boucle à recirculation courte que nous présenterons en détail au paragraphe 4.4.3.1.

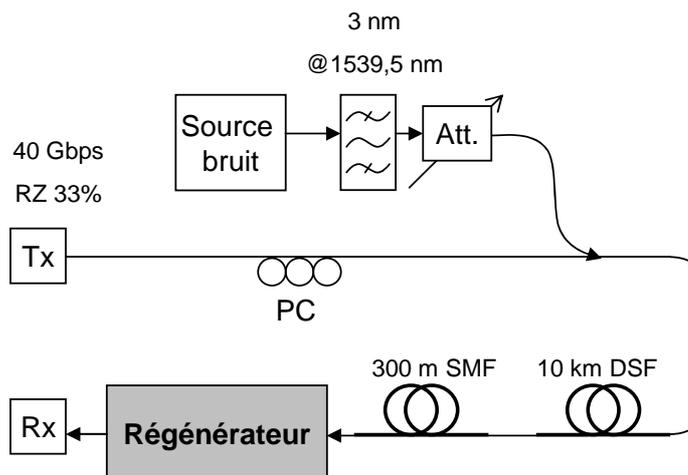


FIG. 4.43 – Montage pour la caractérisation de l'efficacité du régénérateur en déployé.

Le signal est une séquence pseudo-aléatoire de $2^{31} - 1$ bits à 40 Gbit/s avec une puissance de -10 dBm à 1539,5 nm. A cette longueur d'onde, la dispersion de la fibre DSF est de $-0,55$ ps/nm/km ce qui conduit à une dispersion totale de $-5,5$ ps/nm pour 10 km. Une longueur d'environ 300 m de fibre SMF ($D = 17$ ps/nm/km) a été utilisée pour compenser la dispersion. Un contrôleur de polarisation a été inséré dans le montage pour éviter les effets dus à la polarisation du signal. Pour dégrader le signal, nous utilisons une source d'émission spontanée amplifiée couplée au signal après un filtre de 3 nm et un atténuateur variable. En changeant la valeur de l'atténuation, l'OSNR varie dans une gamme de 14,5 à 45 dB/1nm. Notons que le filtre de 3 nm (à 3 dB) joue le rôle de filtre d'entrée pour le compresseur.

Nous allons maintenant présenter nos caractérisations du régénérateur en termes d'amélioration du facteur de qualité du signal. Nous devons, dans un premier temps, préciser comment nous mesurons un facteur de qualité, différent du facteur Q , que nous appellerons facteur d'amélioration du diagramme de l'œil Q -eye.

4.4.2.2 Mesure du facteur de qualité

Le facteur de qualité, appelé facteur Q , est un paramètre permettant de caractériser la qualité d'un signal. Il a été défini au paragraphe 1.1.1.11 et s'exprime par la relation que nous rappelons ici :

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\delta_1 + \delta_0} \quad (4.9)$$

où I_1 et I_0 sont les valeurs moyennes des photo-courants des symboles "1" et "0" et δ_1 et δ_0 , les racines carrées des variances des densités de probabilité des symboles "1" et "0".

Comme nous l'avons vu au paragraphe 4.2.2, la détermination du facteur Q d'un signal avant et après un régénérateur permet d'apprécier la réduction du bruit, et donc l'ouverture du diagramme de l'œil, réalisée par un régénérateur.

La mesure expérimentale du facteur Q d'un signal quelconque, n'est toutefois pas chose aisée car les paramètres de l'équation (4.9), c'est-à-dire I_1 , I_0 , δ_1 et δ_0 , ne sont souvent pas directement mesurables. Afin de contourner le problème, on peut penser à utiliser la relation (1.9) donnant le TEB optimal en fonction du facteur Q à condition des distributions gaussiennes de probabilités des niveaux du signal, que nous rappelons ici :

$$TEB = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \quad (4.10)$$

Cependant, cette relation n'offre un intérêt pratique que lorsque le TEB est mesurable, c'est-à-dire lorsqu'il est supérieur à 10^{-10} en pratique.

Lorsque le TEB est beaucoup plus faible, et que les distributions de probabilités restent gaussiennes, il existe une technique pour mesurer le facteur de qualité Q [159]. Elle consiste à tracer la courbe d'évolution du TEB en fonction du seuil de décision à un instant de décision donné, choisi de manière à ce que le taux d'erreur soit minimum (figure 1.10). Des formes générales pour cette courbe sont illustrées par la figure 4.44. Elle permet de connaître la distribution de probabilité des symboles "0" et des symboles "1". En supposant que ces distributions de probabilité sont gaussiennes, le TEB est relié au seuil de décision D_0 par la relation suivante [23] :

$$TEB = \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left(\frac{I_1 - D_0}{\sqrt{2}\delta_1} \right) + \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left(\frac{D_0 - I_0}{\sqrt{2}\delta_0} \right) \quad (4.11)$$

En pratique, les valeurs de I_1 , I_0 , δ_1 et δ_0 sont déterminées en approchant la courbe expérimentale d'évolution du TEB en fonction de D_0 par la courbe théorique donnée par l'équation (4.11). Le facteur Q peut alors être calculé en injectant les valeurs de I_1 , I_0 , δ_1 et δ_0 dans l'équation (4.9) et, si on le souhaite, le TEB optimal peut être calculé en utilisant l'équation (4.10).

La technique de mesure du facteur Q que nous venons de décrire n'est valable que dans l'hypothèse de distributions de probabilité gaussiennes. Or un signal régénéré ne satisfait plus à cette hypothèse [152]. Cette technique de mesure de facteur Q n'est donc pas valable dans le cas d'un signal régénéré¹.

Si la courbe d'évolution du TEB en fonction de D_0 ne permet pas de calculer le facteur Q , au sens où il est défini par l'équation (4.9), il nous semble toutefois raisonnable de penser que cette courbe, mesurée par exemple avant un régénérateur (figure 4.44.a) et après un régénérateur (figure 4.44.b), permet d'évaluer l'amélioration de la qualité d'un diagramme de l'œil. De plus, nous avons pu constater que la courbe théorique donnée par l'équation (4.11) reste une bonne approximation de la courbe expérimentale d'évolution du TEB en fonction de D_0 pour un signal régénéré lorsque le TEB est supérieur à une certaine valeur (par exemple 10^{-4} dans le cas de la figure 4.44.b pour un OSNR à l'entrée du régénérateur

¹Si elle était valable, nous devrions conclure qu'une amélioration du facteur Q par un régénérateur conduit à une amélioration du TEB optimal, conformément à l'équation (4.10), ce qui, en principe, est impossible [2, 152].

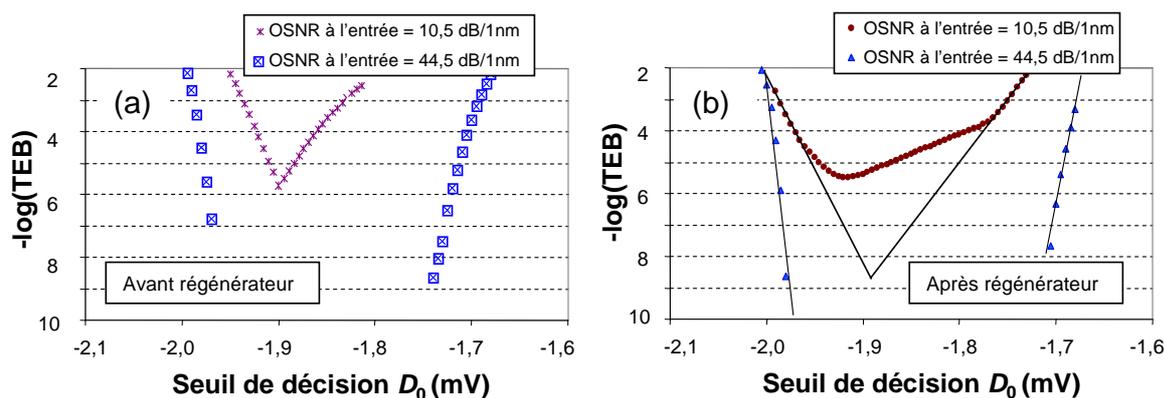


FIG. 4.44 – Evolution du TEB en fonction du seuil de décision (a) pour des signaux dont les distributions de probabilité des symboles "0" et des symboles "1" sont gaussiennes (avant le régénérateur, par exemple) et (b) pour des signaux dont les distributions de probabilité des symboles "0" et des symboles "1" ne sont pas gaussiennes (après le régénérateur, par exemple). Les lignes continues sont les approximations effectuées par les courbes théoriques données par l'équation (4.11).

de 10,5 dB/1nm). Il nous a donc semblé opportun d'évaluer expérimentalement le facteur de qualité du diagramme de l'œil d'un signal régénéré à l'aide des équations (4.11) et (4.9). Nous appellerons ce facteur " Q -eye" pour le différencier du facteur Q qui, rappelons le, ne peut être utilisé que dans le cas de distributions gaussiennes. Nous nous garderons évidemment bien de relier le facteur Q -eye à une quelconque évaluation du TEB. Enfin, nous noterons que dans le cas d'un signal dont la distribution de bruit est gaussienne le facteur Q -eye est identique au facteur Q habituel.

4.4.2.3 Facteur d'ouverture du diagramme de l'œil

La figure 4.45 montre les mesures de TEB en fonction du seuil de décision avec un OSNR de 15,5 dB/1nm avec et sans régénérateur. Nous constatons une nette amélioration de la qualité du signal avec une redistribution des densités de probabilités pour les niveaux "0" et les niveaux "1". La tolérance du seuil de décision pour un TEB de 10^{-9} est presque doublée en présence du régénérateur. Nous appellerons facteur d'ouverture du diagramme de l'œil QI -eye le rapport entre le facteur Q -eye après le régénérateur et le facteur Q -eye avant le régénérateur. Le facteur d'ouverture est estimé dans notre cas à QI -eye = 1 dB. Les diagrammes de l'œil avant et après le régénérateur sont présentés sur la figure 4.46.

En changeant l'OSNR, nous avons obtenu différentes valeurs de QI -eye. Le maximum d'ouverture du diagramme de l'œil se produit pour un OSNR de 17,5 dB/1nm et nous obtenons une valeur de QI -eye = 1,3 dB (figure 4.47). Nous remarquons que plus l'OSNR est grand, moins la valeur de QI -eye est bonne.

Optimisation du régénérateur par un filtre flat-top en entrée

Dans notre étude théorique concernant le régénérateur de Mamyshev, nous avons démontré que le régénérateur fonctionne le plus efficacement avec une largeur spectrale déterminée

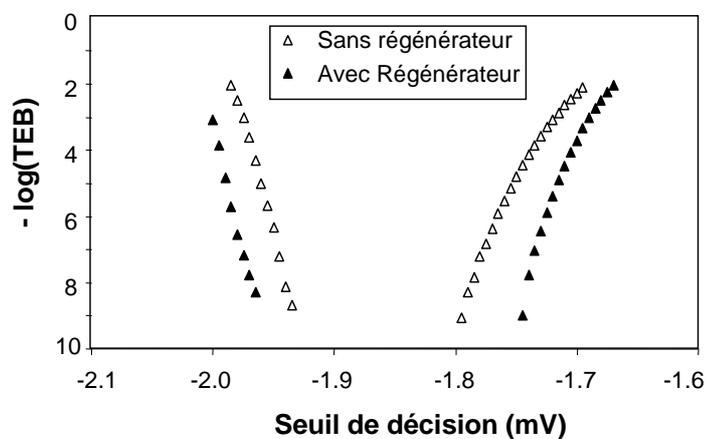


FIG. 4.45 – TEB en fonction du seuil de décision pour un OSNR de 15,5 dB/1nm.

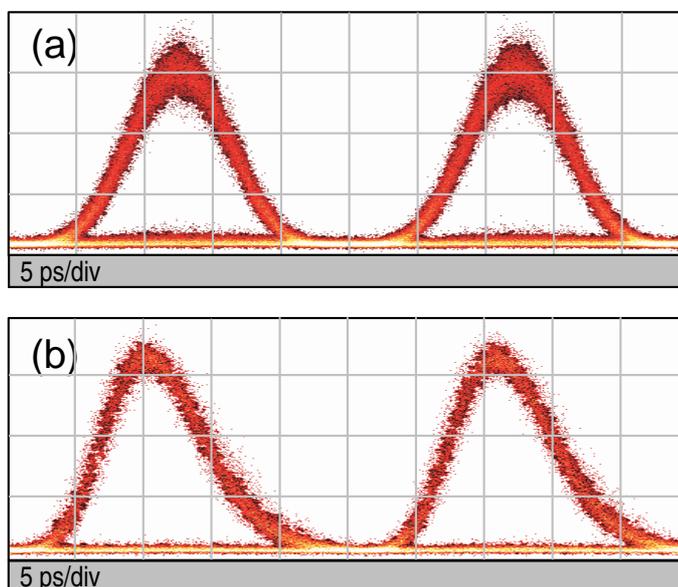


FIG. 4.46 – Diagramme de l'œil pour un débit de 40 Gbit/s : (a) sans régénérateur et (b) avec régénérateur. OSNR = 15,5 dB/1nm.

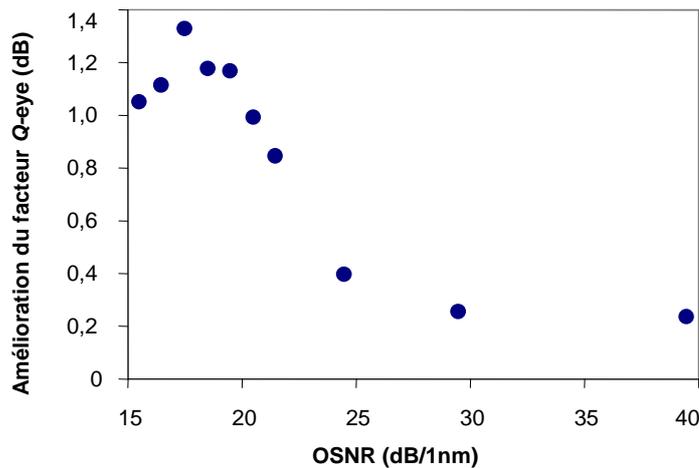


FIG. 4.47 – Amélioration du facteur Q -eye en fonction de l'OSNR (sans pré-filtrage).

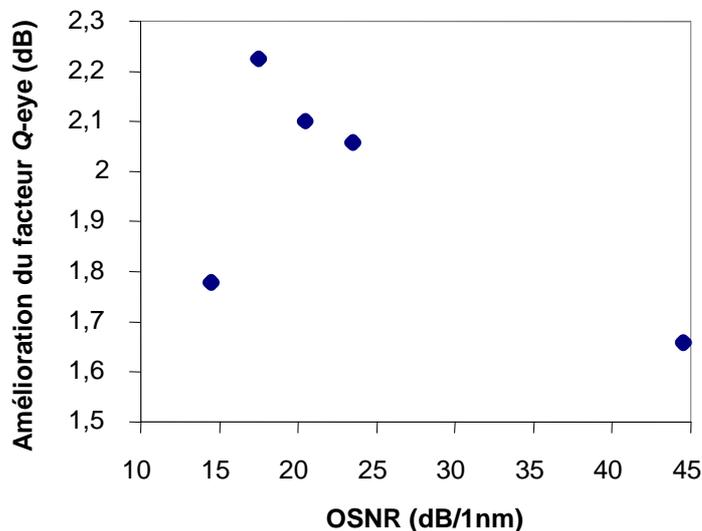


FIG. 4.48 – Amélioration du facteur Q -eye en fonction de l'OSNR en présence d'un filtre de 1,2 nm devant le compresseur.

du filtre en entrée [51].

En plaçant et en optimisant un filtre devant le compresseur, nous avons étudié les performances du régénérateur. Plus de 2,2 dB d'augmentation du facteur d'ouverture du diagramme de l'œil ont été obtenus avec une bande passante de 1,2 nm dans le cas de l'OSNR optimal (17,5 dB/1nm). Pour les valeurs d'OSNR de 17,5 dB/1nm à 23,5 dB/1nm, nous obtenons toujours un facteur QI -eye important (plus de 2 dB). Pour les autres valeurs, plus de 1,6 dB d'augmentation du facteur d'ouverture du diagramme de l'œil ont été mesurés (voir figure 4.48).

Dans les études qui vont suivre, nous avons gardé cette valeur optimale de 1,2 nm pour la bande passante du filtre d'entrée.

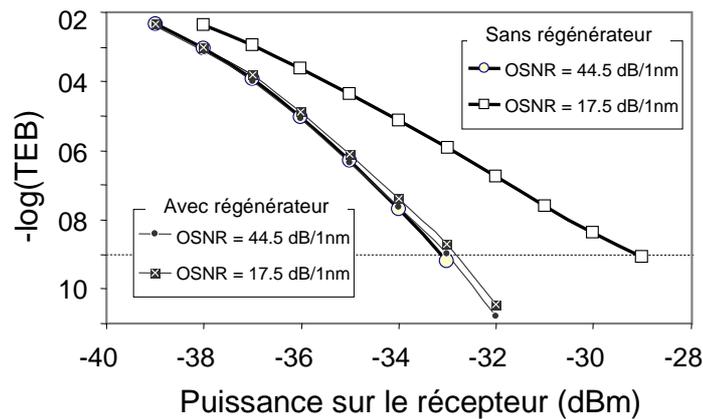


FIG. 4.49 – Evolution du TEB en fonction de la puissance sur le récepteur avec et sans régénérateur dans deux cas : OSNR = 44,5 dB/1 nm, 17,5 dB/1 nm.

4.4.2.4 Pénalités négatives du régénérateur

La figure 4.49 présente les résultats de mesures de la sensibilité du récepteur avec et sans régénérateur dans les deux cas suivants : OSNR de 44,5 dB/1nm et OSNR de 17,5 dB/1nm. Nous remarquons que le régénérateur n'introduit pas de pénalités dans le cas d'un signal non dégradé (OSNR = 44,5 dB/1nm). Dans le cas d'un signal dégradé, le régénérateur permet un gain de 4 dB sur la sensibilité du récepteur pour un TEB de 10^{-9} .

4.4.3 Caractérisations en boucle à recirculation

4.4.3.1 Montage expérimental

La boucle à recirculation est l'outil utilisé au laboratoire FOTON, et en particulier au sein de la plate-forme PERSYST, pour simuler expérimentalement une transmission sur une longue distance à partir d'un nombre limité de composants. Le principe est de faire circuler une séquence de signal, un certain nombre de fois dans la boucle, afin d'atteindre la distance désirée. La boucle représente un pas de transmission constitué généralement d'un tronçon de fibre de transmission (100 km par exemple), de modules d'amplification à fibre dopée erbium (EDFA) ou à effet Raman (RA) et d'un module de compensation de dispersion (DC pour Dispersion Compensation). Deux interrupteurs optiques réalisés à partir de modulateurs acousto-optiques (A/O) sont utilisés (voir figure 4.50). Le premier (appelé A/O de chargement) permet l'injection de la séquence dans la boucle. Le deuxième (appelé A/O de boucle) permet d'extraire le signal au bout d'une distance de transmission donnée.

La figure 4.50 illustre la boucle à recirculation à 40 Gbit/s de notre laboratoire, dite "boucle courte". L'émission est un signal RZ 33% à 40 Gbit/s. La boucle à recirculation comprend une bobine de 10 km de fibre DSF et 300 m de fibre SMF pour compenser la dispersion négative de la fibre DSF. Une source du bruit est couplée à la boucle pour

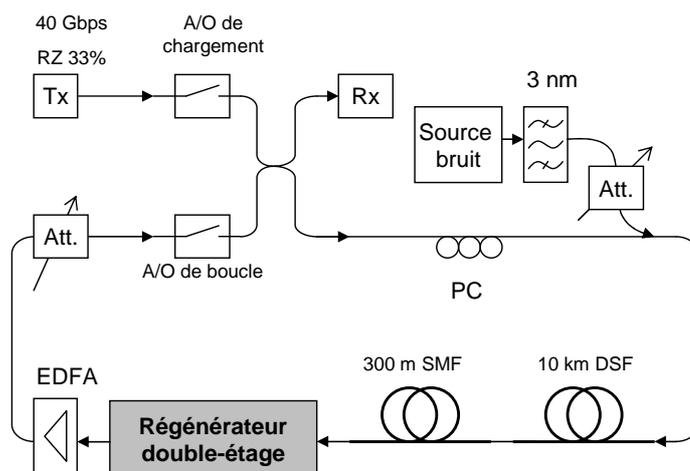


FIG. 4.50 – Montage pour la caractérisation de l'efficacité du régénérateur en boucle à recirculation courte. Tx = émetteur, Rx = récepteur, Att. = atténuateur, PC = contrôleur de polarisation.

dégrader l'OSNR du signal. Un atténuateur variable est placé dans la boucle pour régler la puissance de manière à ce que la puissance dans la boucle soit constante. Un contrôleur de polarisation est utilisé pour éviter des effets dus à la polarisation du signal. La boucle à recirculation courte permet d'étudier la cascabilité des régénérateurs et leur robustesse au bruit optique tout en limitant les effets de propagation dus à la dispersion chromatique et aux effets non-linéaires.

Le régénérateur double-étage est inséré dans la boucle et nous étudions ses performances au bout d'un certain nombre de passages. En particulier, nous étudions l'évolution du TEB en fonction du nombre de passages dans la boucle et le facteur d'augmentation de la distance de transmission.

4.4.3.2 Evolution du taux d'erreur binaire

Pour un OSNR de 23,5 dB/1nm, nous traçons l'évolution du TEB avec et sans régénérateur en fonction du nombre de tours. Les résultats sont présentés sur la figure 4.51.

Sur cette figure, nous constatons trois régimes de fonctionnement pour le régénérateur, numérotés de 1 à 3. Le premier régime (zone 1) correspond à un régime où le TEB se dégrade rapidement. L'explication de cette dégradation vient du fait que, lorsque le TEB est faible (10^{-9} à 10^{-7}) le régénérateur a une influence limitée sur le signal. Celui-ci continue à se dégrader avec le nombre de tours, cependant, à une vitesse moindre que sans le régénérateur. Dans la zone 2, aucune dégradation du TEB n'est observée. Nous constatons que le TEB reste autour de 10^{-7} du 35-ème au 70-ème tour. Cette zone est connue comme étant la zone la plus efficace d'un régénérateur [2, 152]. Dans l'hypothèse où le signal n'est dégradé que par le bruit d'amplitude, la zone 2 doit être théoriquement très large. Toutefois, nous savons que le régénérateur de Mamyshev introduit de la gigue temporelle. Plus le bruit d'amplitude

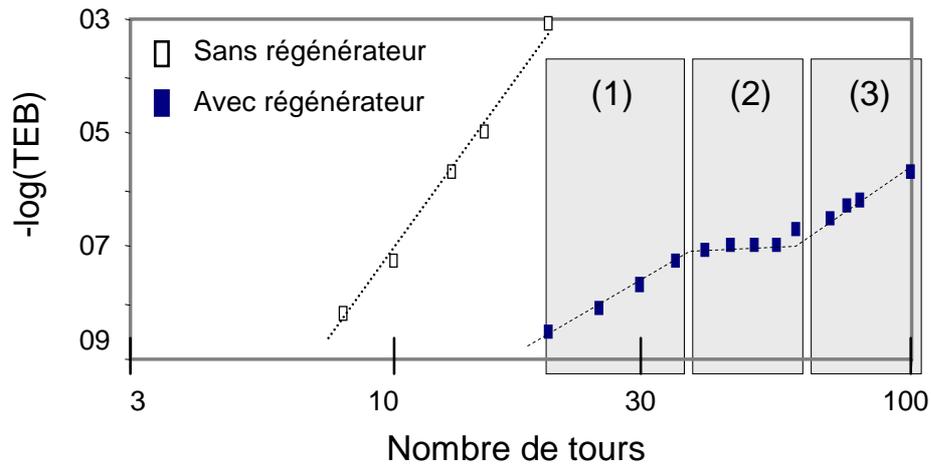


FIG. 4.51 – Evolution du TEB avec régénérateur (points noirs) et sans régénérateur (points blancs) en fonction du nombre de tours pour un débit de 40 Gbit/s (1 tour = 10 km).

est important, plus grande est la valeur de la gigue qu’il introduit [156]. Nous supposons que cette gigue est à l’origine de la troisième zone. Dans la référence [2], les mêmes phénomènes ont été observés et la troisième zone disparaît si l’auteur utilise un régénérateur 3R.

4.4.3.3 Facteur d’augmentation de la distance

Nous dégradons toujours l’OSNR en ligne et nous calculons le facteur d’augmentation de la distance. Il se définit comme le rapport entre la distance de transmission en utilisant le régénérateur et la distance de transmission sans régénérateur pour atteindre un TEB donné. C’est le paramètre qui démontre de manière la plus probante l’efficacité d’un régénérateur [160].

Pour différentes valeurs d’OSNR, nous relevons la distance de propagation avec et sans régénérateur pour un TEB donné. La figure 4.52 représente l’évolution du facteur d’amélioration de la distance, défini par le rapport DIR (Distance Improvement Ratio) entre la distance de transmission avec régénérateur (L_a) et sans régénérateur (L_s) pour un taux d’erreur binaire de 10^{-8} et 10^{-4} en fonction de l’OSNR.

Pour un TEB de 10^{-8} , le facteur d’amélioration est supérieur à 4 pour des OSNR de 17,5 dB/1nm à 20,5 dB/1nm. Lorsque l’OSNR est supérieur 23 dB/1nm, le facteur d’amélioration de la distance diminue et plus l’OSNR est grand, plus l’amélioration de la distance est faible. Cette tendance d’évolution est la même avec un TEB de 10^{-4} , mais le facteur d’amélioration est maintenant égal à 10 pour des OSNR compris entre 17,5 dB/1nm et 20,5 dB/1nm et un peu plus faible pour les OSNR >23 dB/1nm.

4.4.4 Bilan de l’étude expérimentale du régénérateur double-étage

Nous venons de présenter les résultats expérimentaux concernant une nouvelle configuration de régénérateur de Mamyshev double-étage qui comprend un compresseur suivi d’un

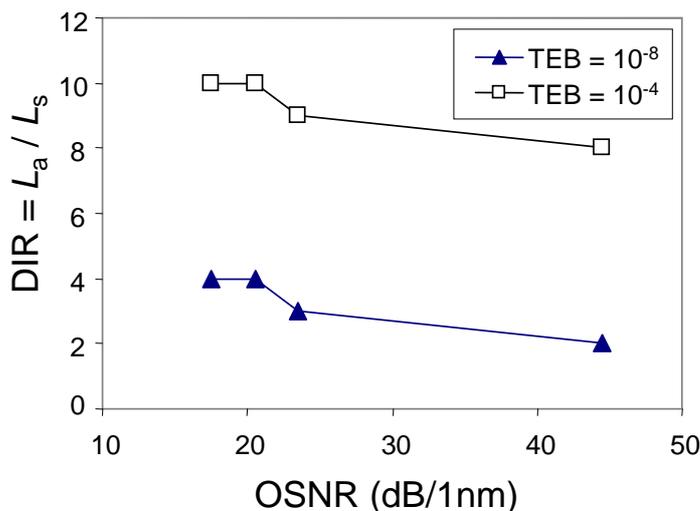


FIG. 4.52 – Evolution du facteur d'amélioration de la distance en fonction de l'OSNR.

régénérateur simple-étage. Ils démontrent l'efficacité de notre configuration. En déployé, nous avons démontré des augmentations du facteur d'ouverture de l'œil Q -eye de plus de 2 dB dans une large gamme de valeurs d'OSNR et une augmentation de 4 dB de la sensibilité sur le récepteur. En boucle à recirculation, nous avons démontré une forte augmentation de la distance de transmission en présence du régénérateur.

Ces résultats intéressants valorisent la configuration expérimentale que nous avons proposée et ouvrent des perspectives pour de nouvelles études. Par exemple, si les règles de conception d'un régénérateur de type B sont parfaitement connues, on pourrait maintenant s'intéresser aux règles de conception de l'étage de compression, afin d'optimiser les performances du régénérateur double-étage. On remarque également que la FdT du compresseur est de type C, ce qui correspond à la solution que nous avons proposée pour limiter la gigue temporelle dans le régénérateur double-étage (paragraphe 4.2.4). Il serait donc intéressant d'étudier si l'utilisation du compresseur a un effet positif sur la réduction de la gigue

Nous allons maintenant présenter des résultats expérimentaux préliminaires concernant l'utilisations de fibres optiques fortement non-linéaires dans la configuration du régénérateur double-étage.

4.5 Un essai avec une fibre optique fortement non-linéaire

Les résultats de simulation et quelques essais de mesures de FdT ont montré que les caractéristiques des fibres non-linéaire HF96 disponibles ne permettent pas d'effectuer un régénérateur de Mamyshev. Nous avons quand même eu l'idée de réaliser un compresseur en utilisant 200 m de fibre HF96 ($D = -20$ ps/nm/km, $\gamma = 38,5$ W⁻¹km⁻¹, $\alpha = 12$ dB/km) associé à un régénérateur utilisant 4 km de fibre DSF afin de réaliser un régénérateur double étage.

Malheureusement, nous n'avons pas observé de compression d'impulsion mais plutôt la

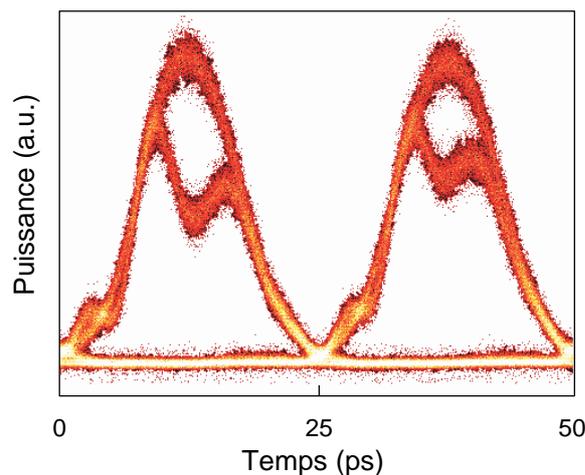


FIG. 4.53 – Diagramme de l'œil après 200 m de HF96 avec un filtre de largeur spectrale 0,76 nm.

présence deux niveaux sur les "1" dans le diagramme de l'œil (figure 4.53) ce qui peut faire penser à la présence d'IFWM.

Nous expliquons l'apparition de cet effet par la forte dispersion associée à la forte puissance injectée dans la fibre. D'après la figure 4.54 qui présente différents spectres du signal, nous constatons que le spectre en sortie de la fibre HF96 (figure 4.54.b) n'est pas élargi autant que le spectre mesuré en sortie de 7 km de DSF (figure 4.54.d) dans la configuration d'un compresseur similaire à celui que nous avons étudié précédemment. Ceci impliquerait que nous n'atteignons pas l'élargissement spectral nécessaire à la réalisation d'un compresseur alors que l'IFWM est déjà apparu.

4.6 Conclusion

Ce chapitre était consacré à l'étude du régénérateur de Mamyshev. Après avoir rappelé le principe et l'état de l'art des études concernant ce type de régénérateur, nous avons présenté les résultats originaux que nous avons obtenus.

Ces résultats originaux concernent dans un premier temps l'étude théorique du régénérateur. En nous basant sur la représentation du régénérateur en tant que fonction de transfert, nous avons proposé un abaque permettant la conception d'un régénérateur de type B, optimal pour la régénération. Nous avons ensuite proposé une analyse beaucoup plus fine du régénérateur qui permet d'évaluer théoriquement l'amélioration du facteur de qualité du signal par le régénérateur [51]. Nous avons à cette occasion introduit la notion de facteur Q -eye permettant de quantifier l'ouverture du diagramme de l'œil afin d'éviter toute confusion avec la notion de facteur Q , traditionnellement attachée au TEB dans le cas de statistiques gaussiennes. Cette approche nous a permis de mettre en évidence le rôle important du filtre en entrée du régénérateur. Elle nous a également permis de révéler le désaccord entre les approches "fonctions de transfert" et "amélioration du facteur de qua-

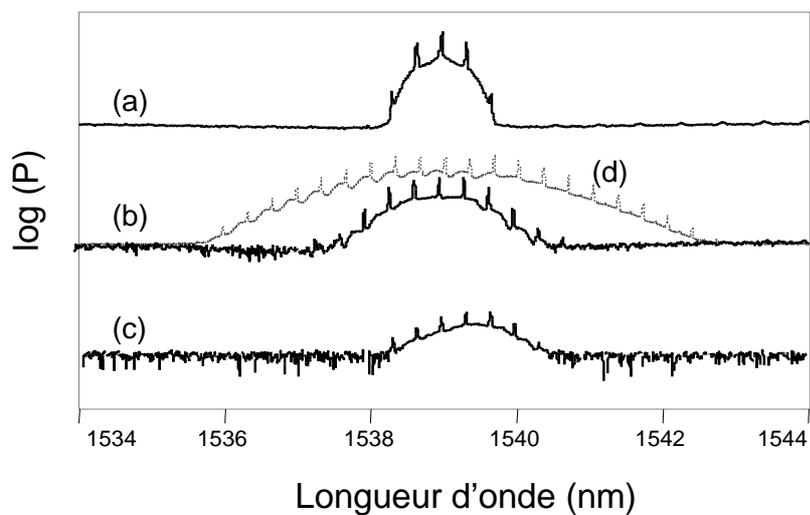


FIG. 4.54 – Spectres du signal en entrée de la fibre HF96 (a), en sortie de la fibre HF96 (b), en sortie du filtre (c) et en sortie des 7 km de fibre DSF avec la même puissance en entrée que pour la fibre HF96 (d).

lité" sur l'évaluation du point de fonctionnement du régénérateur. Nous avons alors proposé une explication à ce désaccord dont l'origine vient de la gigue temporelle introduite par le régénérateur [14, 155] et pourrait être accentué par les variations des durées d'impulsions d'un signal dégradé. Enfin, nous avons proposé une architecture de régénérateur double étage asymétrique permettant de réduire la gigue temporelle introduite par le régénérateur [156].

Nous nous sommes ensuite intéressés à l'étude expérimentale du régénérateur de Mamyshev. Nous avons présenté les mesures de FdT effectuées avec plusieurs fibres non-linéaires disponibles dans notre laboratoire. Nous en avons conclu que la fibre DSF était, pour le moment, la fibre la mieux adaptée à la réalisation d'un régénérateur. Nous avons alors pu obtenir des résultats originaux avec un régénérateur fonctionnant avec un signal RZ 33 % à 40 Gbit/s. Premièrement, nous avons montré que l'effet Brillouin et le mélange à quatre ondes dégradaient les performances du régénérateur [158, 161]. Nous avons alors montré que l'utilisation d'un compresseur d'impulsions avant le régénérateur permettait de réduire considérablement ces effets. Nous avons ensuite proposé une configuration de régénérateur de Mamyshev double-étage qui, en incluant la fonction de compression d'impulsions, est plus simple et fonctionne avec moins de puissance optique que la configuration classique [158, 161]. Nous avons fait la démonstration de l'efficacité de notre proposition de configuration double-étage en boucle à recirculation.