

Validation en configuration système des fonctions optiques considérées

Cette dernière étape de caractérisation des fonctions optiques est fondamentale. Elle permet de valider leur utilisation comme répéteur tout-optique. Tout d'abord, le seuil de prise de décision optique doit être optimal pour minimiser la transmission d'erreurs dans le régénérateur. Ensuite, la redistribution du bruit doit elle aussi être optimale pour maximiser le rapport signal sur bruit en sortie du régénérateur. Enfin, le taux d'extinction de sortie doit être supérieur au taux d'extinction d'entrée.

Nous allons tout d'abord décrire le dispositif expérimental de boucle à recirculation, puis nous testerons la meilleure configuration de régénérateur complet (cascade NOLM-SOA et DE-SOA).

Il est important de noter que les tests en boucle ne sont réalisables que pour des dispositifs non convertisseurs en longueur d'onde. Le NOLM et le Double Etage de SOA étant des dispositifs convertisseurs en longueur d'onde, nous avons dû cascader ces deux fonctions pour avoir la même longueur d'onde en entrée qu'en sortie.

Nous pouvons noter par ailleurs que le Double Etage de SOA et le NOLM inversent la polarité des données ce qui permet, en les cascader, de revenir sur la polarité de départ.

Enfin, nous présenterons les résultats que nous avons obtenus en intégrant le régénérateur complet en boucle à recirculation, pour apprécier l'amélioration du signal due aux passages dans le régénérateur.

2.1 La boucle à recirculation

Ce dispositif permet de simuler des transmissions longues distances ou des multiples passages dans un composant optique²⁰⁰. L'émission et la réception sont identiques à celle décrites dans le « back to back » (Figure 95). Nous avons conservé le débit (10 Gbit/s) mais nous avons choisi le format RZ qui semble favoriser l'amélioration du taux d'extinction des régénérateurs. La puissance crête est plus élevée donc la compression du gain du SOA est augmentée (moins d'émission spontanée amplifiée sur les « 0 » de sortie).

Nous avons aussi favorisé le fonctionnement en 3R pour améliorer encore le taux d'extinction du NOLM et améliorer le seuil de décision optique.

a) Présentation du dispositif expérimental

La Figure 114 présente le schéma de la boucle à recirculation qui a été montée au laboratoire :

l'émission et la réception se font à 10 Gbit/s sur format RZ de taux de remplissage proche de $\frac{1}{2}$.

Nous pouvons présenter simplement le principe de la boucle à recirculation :

Cette configuration de transmission permet de créer des « paquets optiques », transportant de l'information, qui vont circuler dans une boucle et ressortir pour être analysés au bout du nombre de tours souhaité.

La création des paquets est réalisée avec des modulateurs acousto-optiques (switch A/O) pilotés par un générateur de créneaux (Stanford DG535). Le switch A/O d'entrée va se fermer pendant un temps T_P (temps paquet) inférieur au temps boucle T_B , le temps de propagation de la lumière dans la boucle (10 km correspond à un temps de propagation de 50 μ s). Nous utilisons des EDFA dans la boucle, ce qui nécessite d'avoir toujours de la puissance optique dans la boucle (pour éviter des puissances crêtes trop importantes, il est préférable de toujours charger les amplificateurs à fibre dopée).

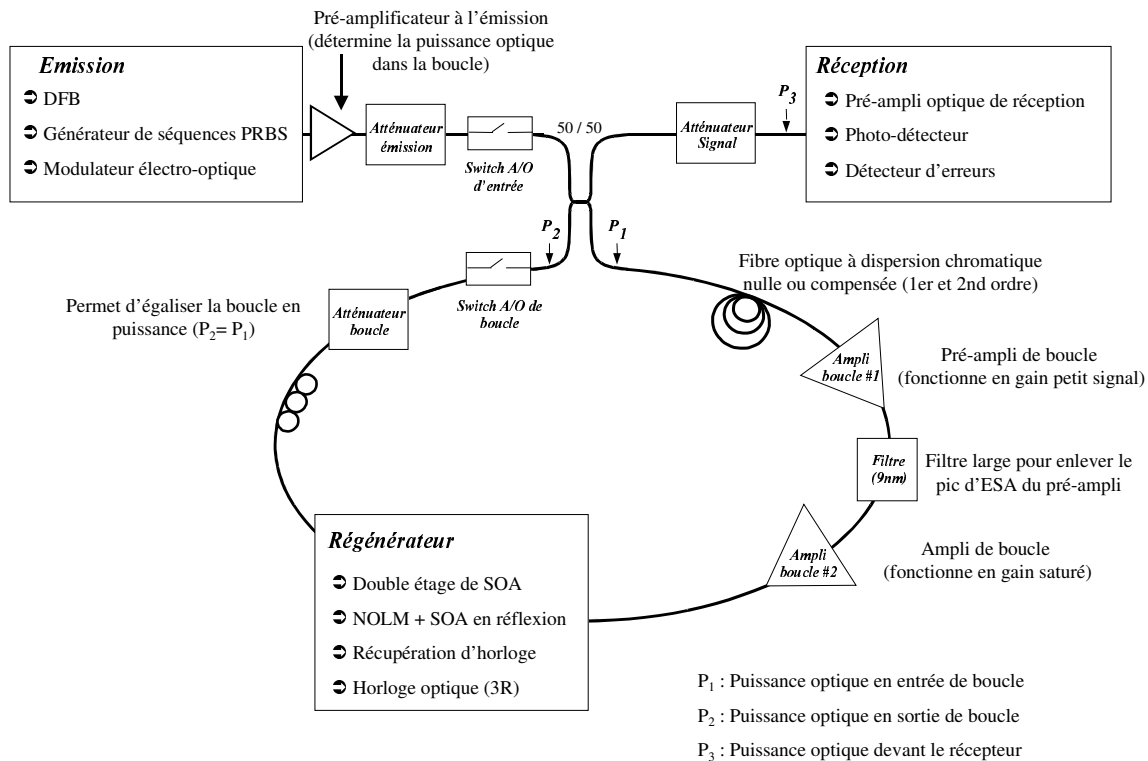


Figure 114 : Schéma de la boucle à recirculation

Le principe de la création des paquets optiques peut être compris plus simplement en se reportant à la Figure 115 qui permet de visualiser les paquets.

Nous suivons les différentes étapes du chronogramme :

t_1 : Pendant que le switch d'entrée est fermé (la boucle se charge des données), le switch de boucle est ouvert (rien ne sort de la boucle). La puissance optique détectée en sortie de boucle (P_3) correspond au « back to back ».

t_2 : Dès que le switch de boucle se ferme, il laisse sortir de la boucle des données qui ont parcouru un tour de boucle. On observe une superposition des puissances optiques du « back to back » avec celle du premier tour. Cette superposition est obtenue en augmentant légèrement la durée du temps de chargement de la boucle (switch d'entrée) par rapport au temps du switch de boucle (recouvrement de 5 μ s).

Ce réglage permet de visualiser le début du paquet qui a fait 1 tour et de pouvoir se situer facilement dans les paquets.

t_3 : Le coupleur d'entrée / sortie de la boucle n'a laissé sortir que 50% de la puissance optique de la boucle. Le reste du signal a donc parcouru 1 tour de plus. Le deuxième paquet ressort (deux tours de boucle) et ainsi de suite.

Le signal de synchronisation est un créneau électrique synchrone avec les créneaux de tension appliqués aux switches A/O pour déclencher leur ouverture et / ou fermeture. Ce créneau est envoyé sur le détecteur d'erreurs pour déclencher sa mesure. En déplaçant temporellement ce créneau, on peut mesurer les erreurs dans chacun des paquets et donc mesurer les erreurs pour les paquets optiques du « back to back », du premier jusqu'au $N^{\text{ième}}$ tour.

On simule alors des transmissions de distance N fois la longueur de fibre dans la boucle.

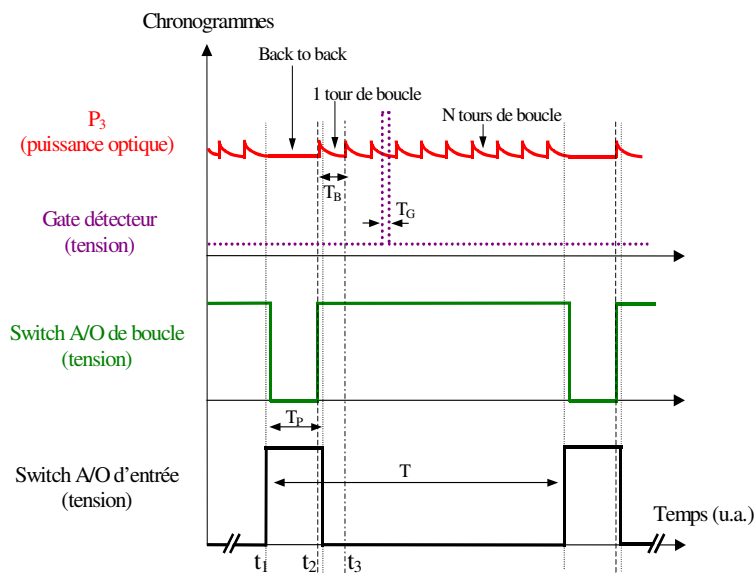


Figure 115 : Principe du mode « paquet » dans la boucle à recirculation

Sur la Figure 115, les « pics » présents sur la puissance optique permettent de délimiter temporellement les paquets, ils correspondent à la superposition de deux paquets successifs (switchs A/O d'entrée et switch A/O de boucle légèrement décalés temporellement). Leur forme caractéristique est due à la réponse lente du photo-détecteur devant la durée de front montant des paquets optiques.

La fibre que nous avons utilisée est une fibre optique à dispersion décalée (SMF/DS de Corning) qui possède une dispersion chromatique nulle à 1550 nm et permet éviter les déformations du signal. Cette fibre possède un cœur plus petit qui favorise les non-linéarités (SPM) de propagation. Il est donc très important de se propager dans cette fibre avec une puissance crête relativement faible (nous avons observé des effets non-linéaires dès 5 dBm en entrée de boucle).

Les amplificateurs de boucle jouent chacun un rôle précis. Le pré-amplificateur de boucle doit compenser les pertes apportées par la propagation dans la fibre (on compte 0,2 dB/km) ainsi que les pertes du coupleur et du switch. Il doit fonctionner en régime de saturation pour ne pas trop dégrader le rapport signal à bruit optique.

Un filtre optique (Fabry-Perot) de largeur 9 nm est placé après le pré-ampli pour couper le « pic » de fluorescence de l'erbium, non négligeable pour ce régime de fonctionnement (petit signal) et susceptible d'être amplifié d'un tour à l'autre.

Le second EDFA doit permettre d'égaliser parfaitement les pertes de la boucle entière pour avoir sur le récepteur, la même puissance optique moyenne dans le paquet de référence ou « back to back » (qui ne s'est pas propagé dans la boucle) et dans les autres paquets (qui eux se sont propagés dans la boucle).

Il est important de noter que les amplificateurs fonctionnent à gain constant. Pour des pertes constantes dans la boucle, la boucle est équilibrée.

Le régénérateur complet à tester est placé dans la boucle et ne doit pas apporter de pertes supplémentaires. La boucle à vide sera désormais notre référence.

Le contrôleur de polarisation est placé en sortie de boucle pour conserver une polarisation « à peu près » identique à chaque passage dans le coupleur de sortie. Cette précaution permet de minimiser les effets de PDL dans la boucle.

L'atténuateur de sortie permet d'égaliser la puissance optique des paquets sur le « back to back ».

b) Les contraintes de l'environnement système

Nous allons insister sur les difficultés inhérentes aux transmissions sur fibre optique. La boucle à recirculation rencontre les mêmes problèmes que les systèmes réels à l'exception du fait, que l'on peut plus facilement gérer les paramètres d'un tour de boucle, que dans une transmission complète sur fibre installée.

Tout d'abord, notre objectif est de régénérer le signal. Nous avons vu précédemment que les régénérateurs étaient relativement tolérants au bruit optique mais très sensibles à la puissance optique (réglages compliqués du Double-Etage de SOA, instabilité dans le NOLM). C'est pourquoi nous avons restreint notre étude au régime linéaire de transmission qui va minimiser les déformations du signal.

Nous avons réalisé une boucle courte pour ne pas accumuler trop de dispersion chromatique en un seul tour, ce qui pourrait être critique compte tenu de la largeur spectrale du signal 3R en sortie du NOLM (environ 1 nm à 3 dB).

Les résultats concernant la boucle à recirculation à vide sont présentés sur la Figure 116.

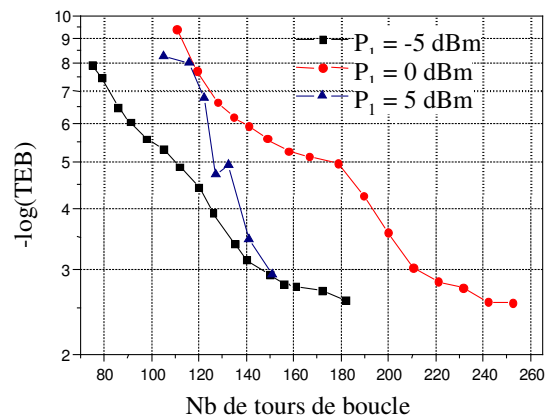


Figure 116 : Caractérisation de la boucle à vide en fonction de la puissance optique en entrée

La fibre dans la boucle est du type DSF (G653) de longueur 11,4 km. La puissance en entrée de boucle est variable (P_1). Plus la puissance est importante et plus l'auto-modulation de la phase dû à l'effet Kerr sur le signal est favorisée. Cet effet a tendance à élargir le spectre du signal en fonction de sa puissance optique. Nous distinguons sur la Figure 116 que plus la puissance en entrée de boucle est importante et plus la courbe de taux d'erreurs binaires en fonction du nombre de tours dans la boucle, est irrégulière.

Pour une puissance de -5 dBm dans la boucle, nous sommes dans un régime quasi-linéaire.

Par contre, pour une puissance de boucle de 5 dBm, la dégradation du TEB en fonction du nombre de tours de boucle n'est plus constante et indique clairement que les dégradations du du signal ne sont plus uniquement dues à la dégradation du rapport signal sur bruit optique : nous sommes en régime non-linéaire de transmission.

Pour confirmer cette hypothèse, nous avons calculé la puissance soliton pour ce type de fibre : cette valeur correspond à la puissance crête pour laquelle on excite le soliton fondamental (équilibre entre les effets de dispersion chromatique et les effets non-linéaires).

La puissance soliton pour une impulsion de 60 ps (hypothèse gaussienne) est $P_{Soliton} = -2,5$ dBm, pour un $\beta_2 = -1$ ps²/km et $\gamma = 2$ W⁻¹/km.

La puissance moyenne correspondant est d'environ -5 dBm, ce qui justifie le régime quasi-linéaire de propagation.

Les dégradations sont donc principalement dues à l'accumulation du bruit des amplificateurs optiques. Nous pouvons préciser que l'OSNR mesuré en entrée de boucle sur $0,5$ nm est de $-38,5$ dB. Il est pour cette puissance d'entrée de $-34,4$ dB en sortie de boucle.

Pour une puissance de 5 dBm dans la boucle, la transmission est principalement non-linéaire. C'est à dire que l'élargissement du spectre du signal et le déphasage de ses composantes spectrales vont modifier, le long de la transmission, l'enveloppe des impulsions. Nous pouvons observer ce phénomène sur le diagramme de l'œil le long de la transmission. Nous pourrions nous reporter à la Figure 117.

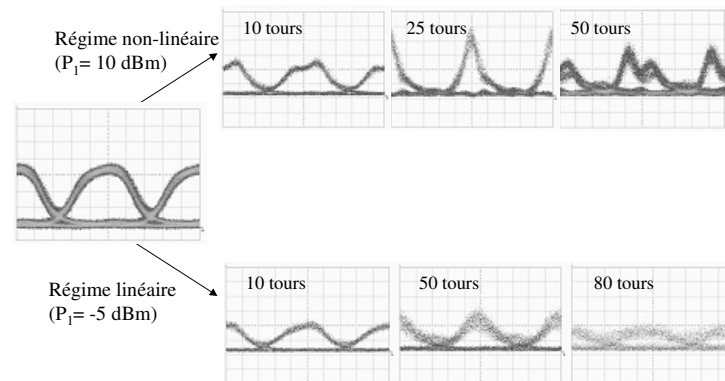


Figure 117 : Evolution du diagramme de l'œil pour les deux régimes de transmission

Pour le régime non-linéaire, l'enveloppe est trop déformée pour conserver un diagramme de l'œil ouvert. La mesure du taux d'erreurs ne peut être fiable.

Pour le régime quasi-linéaire, le diagramme de l'œil est beaucoup moins déformé. Nous avons utilisé cette puissance d'entrée pour les expériences de régénération en boucle à recirculation.

2.2 Optimisation de la configuration du régénérateur complet

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons étudié séparément, les deux fonctions optiques pour la régénération que sont le NOLM-SOA et le Double-Etage de SOA (en configuration 2R et avec le format NRZ).

Afin de tester en boucle à recirculation nos régénérateurs, il est essentiel d'optimiser la meilleure configuration pour la cascade du Double-Etage de SOA et de NOLM-SOA. Nous avons donc le choix entre deux configurations possibles : le Double-Etage suivi du NOLM, ou bien l'inverse. Nous rappelons qu'il est essentiel pour ce genre de test de garder la même porteuse optique en entrée et en sortie du régénérateur, d'où la mise en cascade des deux fonctions optiques utilisées en conversion de longueur d'onde.

Il ressort globalement de cette étude que, en régime normal de fonctionnement, le DE-SOA possède un taux d'extinction de sortie supérieur au NOLM-SOA et que le NOLM-SOA réduit le bruit sur les « 1 » et les « 0 » alors que le DE-SOA ne réduit que le bruit sur les « 0 ».

a) Avec le format NRZ

Dans un premier temps, nous caractérisons la cascade de régénérateur avec un signal NRZ en entrée. Ce format constitue le format standard dans les transmissions à 10 Gbit/s.

La Figure 118 présente les mesures réalisées pour les deux configurations possibles en NRZ.

La Figure 118 (a) correspond à la configuration optimisée Double-Etage de SOA suivi du NOLM. Nous avons indiqué la pénalité introduite par le DE-SOA (0,6 dB) puis celle pour le régénérateur complet (2,2 dB). Le taux d'extinction en sortie du NOLM est plus petit que celui en sortie du DE-SOA.

La Figure 118 (b) correspond à la configuration optimisée NOLM suivi du DE-SOA. La pénalité introduite par le régénérateur complet est à peu de chose près identique à la pénalité introduite par la configuration précédente (2,1 dB), mais pour cette configuration, le Double-Etage améliore le signal (pénalité « négative » par rapport au NOLM seul). Nous avons déjà insisté sur ce point, mais il semble toujours important de dire qu'une pénalité « négative » est due au fait que le signal change (améliore le récepteur), et ne correspond jamais à une diminution des erreurs. Ainsi, nous pouvons dire que l'introduction du Double-Etage va améliorer le signal sur le récepteur mais le seuil de décision optique sera déterminé par le NOLM (qui est placé devant).

Dans ces conditions, pour le format NRZ, la configuration DE-SOA suivi de NOLM est retenue pour le régénérateur complet.

Nous pouvons signaler que le NOLM possède un meilleur rapport signal sur bruit optique en sortie, sa position après le Double-Etage de SOA est un atout pour la régénération efficace du bruit.

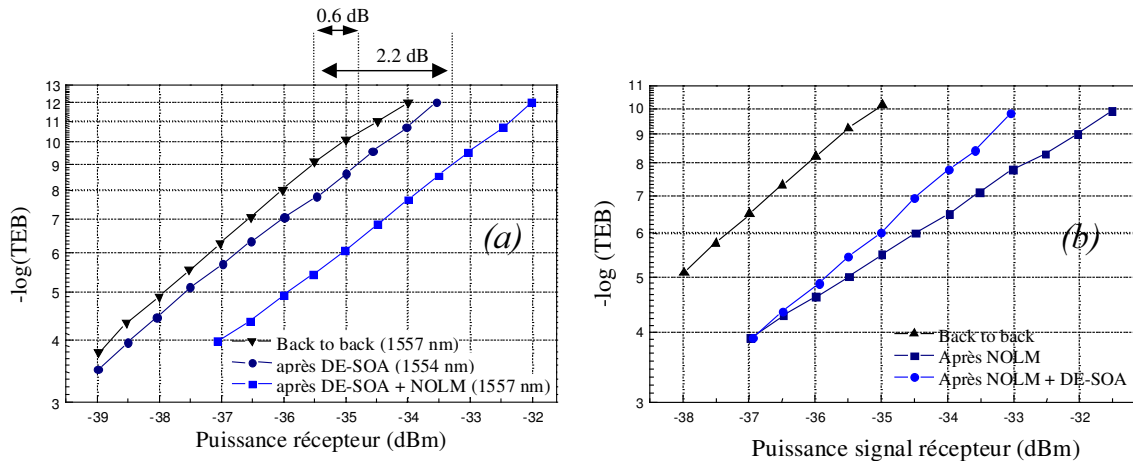


Figure 118 : Pénalité sur le récepteur introduite par la cascade de régénérateurs (pour les deux configurations possibles)

b) Avec le format RZ

Enfin, nous avons testé le régénérateur avec notre format RZ (60 ps) en 2R (les sondes sont continues) et en 3R. La configuration 3R correspond simplement à faire fonctionner le régénérateur de sortie (NOLM) en 3R, c'est à dire utiliser une horloge optique en guise de sonde.

Nous rappelons que le format RZ est très utilisé pour les transmissions à très haut débit (à partir de 40 Gbit/s) ainsi que pour les transmissions de type « sous-marin ». Il est plus robuste aux variations de format et a donc été retenu pour les tests de régénération en boucle à recirculation.

La configuration retenue est donc :

- 2R sur le Double-Etage de SOA .
- 3R sur le NOLM. Nous pourrions nous reporter à la Figure 119 présentant le dispositif expérimental du régénérateur complet 3R pour un signal RZ à 10 Gbit/s.

Pour le premier convertisseur en longueur d'onde, le Double Etage de SOA, la sonde est continue et la pompe porte les données RZ à 10 Gbit/s. Nous n'avons pas représenté les atténuateurs optiques (cf. Figure 100) permettant d'effectuer tous les réglages optiques. Les SOA sont polarisés avec un courant de 300 mA. Des contrôleurs de polarisation permettent de limiter les effets de PDL dans le DE-SOA (accentué par la présence de deux SOA). On peut observer le diagramme de l'œil en sortie du DE-SOA, il présente la qualité du signal converti en longueur d'onde, avec les données inversées.

Le second convertisseur est le NOLM-SOA polarisé aussi avec un courant de 300 mA. Le NOLM est en configuration réflexion pour une meilleure stabilité. La sonde est locale, à la longueur d'onde du signal entrant dans le régénérateur et pour cette configuration, elle est pulsée (DFB à commutation de gain – source S_2). La sinusoïde qui module le gain de S_2 est obtenue avec un dispositif de récupération d'horloge. Il est constitué d'une photodiode suivi d'un amplificateur large bande suivi d'un filtre électrique (Telonic Berkeley 9953-20-4SS1 possédant un Q de 1000) et enfin d'un amplificateur à bande étroite (10 GHz) pour être injecté dans le laser. La puissance optique sur la photodiode de récupération d'horloge est constante pour avoir une sinusoïde électrique d'amplitude constante. La récupération

d'horloge est réalisée en amont du régénérateur. Une ligne à retard optique est placée entre la sonde et le régénérateur afin de synchroniser l'impulsion d'horloge dans la fenêtre de transmission du NOLM.

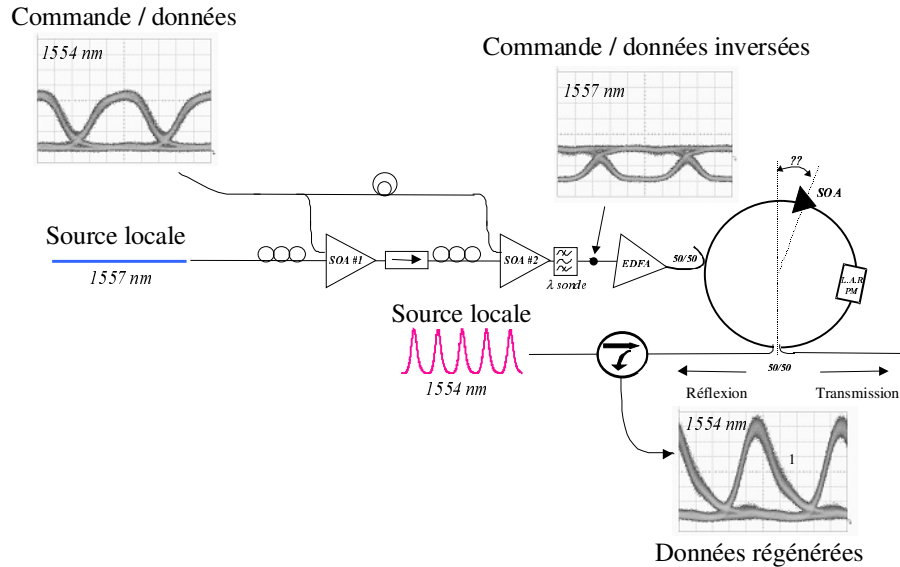


Figure 119 : Schéma du régénérateur complet DE-SOA et NOLM en cascade en configuration 3R pour le format RZ à 10 Gbit/s

Nous avons testé le régénérateur complet en boucle déployée afin d'égaliser le gain et les pertes dans la boucle et de mesurer la sensibilité du récepteur en présence du régénérateur.

La boucle déployée correspond à la configuration identique à celle de la boucle mais sans le coupleur entrée / sortie (50/50). Elle permet d'effectuer les réglages correspondant à un tour de boucle (dégradation OSNR, forme du signal, pénalité sur le récepteur, etc...)

Les résultats sont présentés sur la Figure 120. Ils correspondent aux mesures réalisées en boucle déployée pour une régénération 2R (nous n'allumons pas la récupération d'horloge) et pour une régénération 3R.

En configuration 2R, la pénalité sur le récepteur est 1,8 dB et nous avons observé un plancher d'erreurs ($>10^{-11}$) qu'aucun réglage n'a pu faire disparaître (ni les puissances de sonde dans le régénérateur qui permettent de décaler le seuil de décision optique, ni le seuil de décision électrique de la valise). Nous n'avons pas réussi à déterminer l'origine du plancher d'erreurs pour cette configuration. Les résultats en boucle n'ont donc pas été possibles.

En configuration 3R, nous avons un signal très proche de la source impulsionnelle avec un taux d'extinction de 11,5 dB. La pénalité sur le récepteur est donc diminuée (0,7 dB) et nous n'avons pas observé de plancher d'erreurs. C'est donc avec cette configuration que nous avons réussi à tester notre régénérateur en boucle à recirculation.

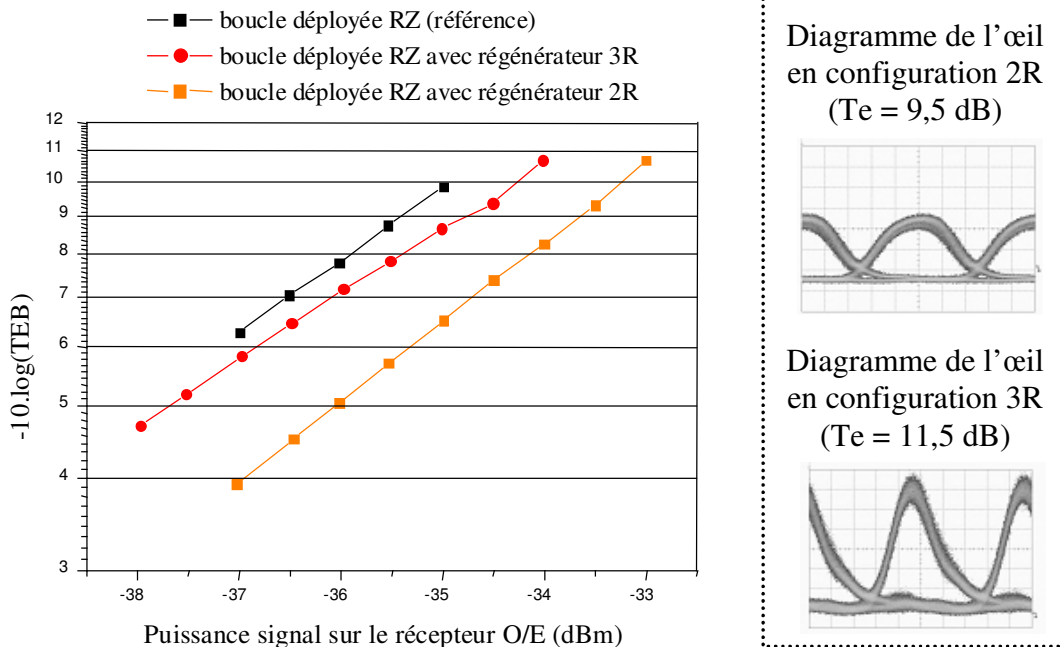


Figure 120 : Performances du régénérateur en configuration 2R et 3R en boucle déployée

2.3 Les résultats en boucle à recirculation

Les résultats que nous avons obtenus en boucle déployée étaient très encourageants. Nous avons donc essayé de placer le régénérateur complet (DE-SOA en 2R suivi du NOLM+SOA en 3R) en boucle à recirculation.

Nous avons déjà décrit le dispositif expérimental de la boucle à recirculation à vide :

La durée du temps paquet (T_P) dans 11,4 km de boucle est de 57 μs .

La durée du temps boucle (T_B) est de 200 μs .

La durée du temps de mesure ou temps « Gate » (T_G) est de 10 μs .

La puissance du signal dans la boucle est de -5 dBm .

La dégradation de l'OSNR dans le pré-ampli est de 3 dB.

La dégradation de l'OSNR dans l'amplificateur de boucle est de 1 dB.

L'introduction du régénérateur dans la boucle ne doit pas générer de pertes supplémentaires dans la boucle. On effectue les réglages optiques en boucle déployée :

La puissance optique sur la récupération d'horloge est de -9 dBm . La puissance électrique de la sinusoïde à 10 GHz est de 16 dBm (sur 50 Ω).

La puissance signal (pompe) devant le régénérateur est de -6 dBm , la puissance de sonde est de -12 dBm . La puissance de pompe dans le NOLM est de 4,5 dBm et la puissance de sonde est de -5 dBm .

La procédure de réglage du DE-SOA a déjà été décrite. La ligne à retard optique de l'horloge dans le NOLM est réglée « grossièrement » avec le diagramme de l'œil puis « finement » en améliorant le taux d'erreurs.

On remet en place le coupleur entrée / sortie de boucle pour revenir à la configuration « boucle à recirculation ».

Le réglage le plus sensible a été celui des contrôleurs de polarisation dans la boucle. Plusieurs composants dans la boucle sont sensibles à la polarisation et susceptible de générer d'un tour sur l'autre des effets de PDL (principalement les coupleurs et les SOA).

Nous avons fait attention à faire fonctionner les amplificateurs optiques (EDFA) en régime de saturation (la puissance d'entrée des amplis était de -10 dBm) pour minimiser les effets de fluctuation de puissance dans la boucle. Le premier amplificateur dans la boucle permet de compenser les pertes dans la fibre, dans les switches A/O et dans les coupleurs. Le second permettait d'avoir une puissance suffisante en entrée du régénérateur.

Nous avons donc réussi à faire fonctionner le régénérateur en boucle à recirculation, à mesurer le diagramme de l'œil et un taux d'erreurs très instable ne permettant pas de réaliser des mesures fiables. Nous supposons que cette instabilité du taux d'erreurs est directement lié à la grande sensibilité du Double-Etage de SOA à la polarisation du signal en entrée du régénérateur complet.

Nous n'avons donc pas pu étudier réellement l'efficacité de la régénération mais à partir du diagramme de l'œil, nous avons pu mesurer l'ouverture de l'œil au bout d'un certain nombre de passage dans le régénérateur.

En comparant avec les résultats obtenus avec la boucle à vide, nous avons pu montrer que le signal en sortie du régénérateur était très peu dégradé pour un nombre de tour de boucle importants. À défaut de mesure de taux d'erreurs précise, nous avons essayé de traduire la faible dégradation du signal avec régénérateur et de la comparer à celle du signal sans régénérateur par une mesure de facteur Q.

Avant de présenter les résultats, il est important de rappeler la pertinence des mesures de facteur Q dans les transmissions non-linéaires.

La mesure de facteur Q a été introduite dans les télécommunications optiques pour sa capacité à pouvoir déduire un taux d'erreurs dans le cadre de la statistique gaussienne du bruit optique des amplificateurs à fibre et du bruit électrique. Le facteur Q ne tient pas compte des « queues » des distributions du bruit sur le signal.

Dans le cadre des transmissions non-linéaires du bruit optique, nous avons déjà vu dans le premier et le troisième chapitre que les distributions étaient déformées et perdaient leur forme gaussienne.

Nous avons donc réalisé des mesures de facteur Q sur des distributions de bruit non gaussiennes. L'écart type (variance en intensité) est donc prise au sens des moindres carrés comme une évaluation statistique de la distribution non gaussienne du bruit. Dans ces conditions, cette mesure nous a permis de mettre en évidence la faible dégradation du signal en sortie du régénérateur sans donner d'information sur le taux d'erreurs.

Les résultats sont présentés sur la Figure 121 et la Figure 122.

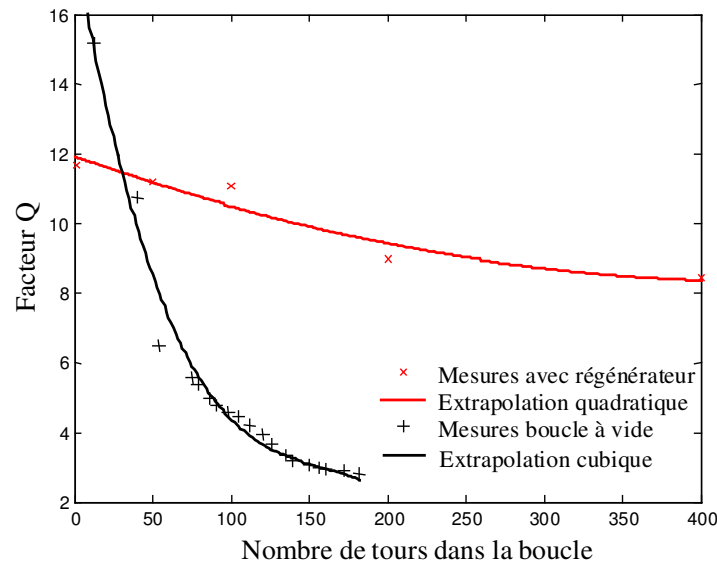


Figure 121 : Evolution du facteur Q de la transmission en fonction du nombre de tours de boucle

Le facteur Q est mesuré pour la courbe avec régénérateur, à partir du diagramme de l'œil visualisé sur l'oscilloscope à échantillonnage en mode « paquet ». Cette option essentielle permet de déclencher l'acquisition du diagramme de l'œil dans les paquets (Oscilloscope Infinium 86100A).

Cette courbe montre que le signal passant dans le régénérateur est faiblement dégradé après de multiples passages. Le taux d'erreurs était compris entre 1.10^{-9} et 1.10^{-7} dès le premier tour pour osciller autour de 1.10^{-4} après 400 tours.

Ce résultat met en évidence la possibilité d'avoir un très bon facteur Q (œil bien ouvert) et un taux d'erreurs très bas. La transformation du bruit ne permet plus de relier ces deux grandeurs.

En ce qui concerne le signal sans régénération (boucle à vide), la mesure a été réalisée à partir du diagramme de l'œil pour les taux d'erreurs supérieurs à 1.10^{-9} (correspond pour une statistique gaussienne à un facteur Q égal à 6), et à partir du taux d'erreurs pour un signal dégradé (pour lequel le taux d'erreurs pouvait être mesuré).

Nous remarquons qu'avec le régénérateur, le signal de sortie est de bonne qualité après 400 tours, même si nous supposons qu'il existe un plancher d'erreur important.

Sur la figure suivante, nous pouvons observer la forme du diagramme de l'œil après 5000 km de propagation avec régénérateur et la comparer avec le diagramme de l'œil du signal sans régénérateur.

Si nous considérons que le régénérateur possède un seuil de décision optique mal réglé ou très sensible aux variations de la polarisation du signal optique en entrée (ce qui va générer de la PDL), c'est à dire que la discrimination des « 1 » et des « 0 » entrant dans le régénérateur se fait mal. Au bout de 400 passages, le plancher d'erreurs commence à apparaître sur le diagramme de l'œil. On peut en effet distinguer des points à l'intérieur de l'œil mesuré en boucle à recirculation.

Néanmoins, ces résultats sont très encourageants puisqu'ils met en évidence la cascabilité de notre régénérateur avec un facteur Q de bonne qualité.

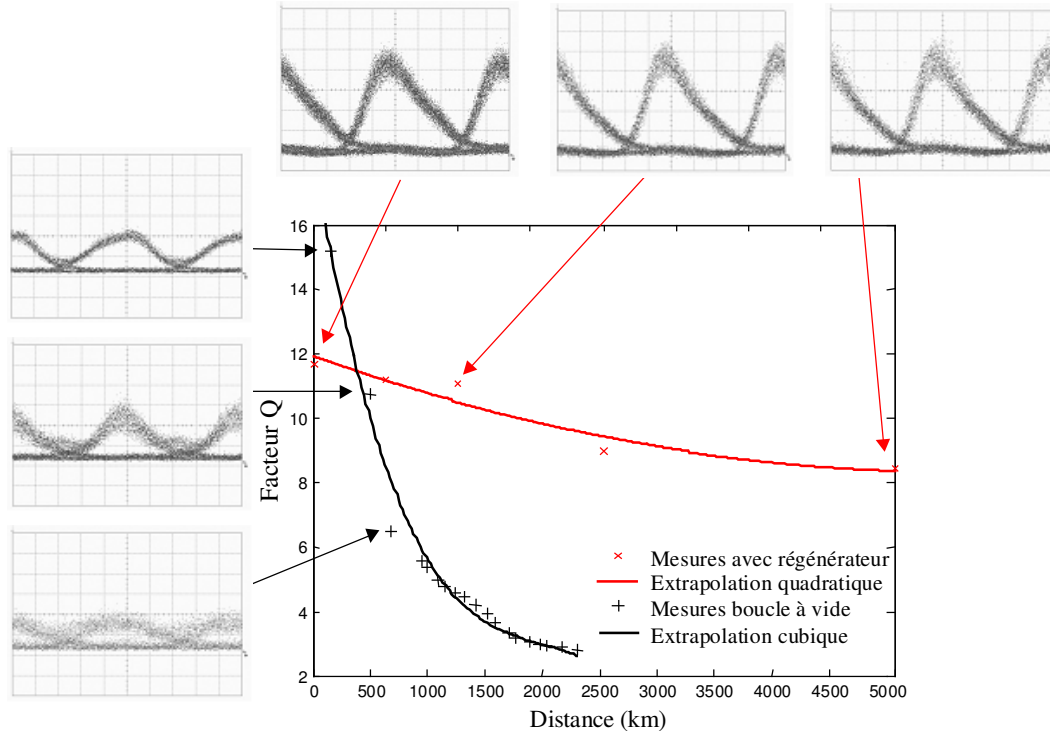


Figure 122 : Evolution du signal régénéré en fonction de la distance de propagation

Il semble que notre régénérateur possède toutes les qualités requises pour fonctionner en boucle à recirculation et pouvoir réaliser des transmissions « infinies ».

Cependant, nous n'avons pas encore pu, à l'heure actuelle, éliminer le plancher d'erreurs en boucle, présent dès le premier tour, alors qu'aucun plancher n'est observé en ligne déployée.

Le fait de ne pas avoir le même signal en entrée et en sortie est peut-être à l'origine du mauvais fonctionnement en boucle. Le fait de modifier le signal après un tour de boucle pourrait modifier le seuil de décision optique du régénérateur et provoquer le plancher d'erreurs observé dès le premier tour.

Il serait donc intéressant de poursuivre cette étude en changeant soit le format RZ du signal en entrée ou soit en changeant le format de l'horloge du NOLM. Nous conserverions ainsi les mêmes niveaux de puissance crête et les mêmes formats de compression du gain dans le double étage de SOA.

Il serait intéressant par ailleurs de placer en première position, dans le régénérateur complet, le NOLM. Au regard des résultats expérimentaux, il semble que le NOLM soit beaucoup moins sensible à la polarisation du signal de pompe que le double étage de SOA.

Il semble qu'une sensibilité importante à la polarisation soit un paramètre rédhibitoire en boucle à recirculation, alors que la sensibilité à la phase ne soit qu'un paramètre limitant.

Cette étude devra être poursuivie au laboratoire, en tenant compte de toutes les observations apportées pendant ce travail expérimental.

Conclusion

Nous avons étudié en détail les propriétés régénératives du Double-Etage de SOA et surtout du NOLM en réflexion. Sa configuration est originale et permet de réaliser des régénérateurs adaptés au fonctionnement en 2R et 3R pour des signaux NRZ et RZ à 10 Gbit/s^{201,202}.

La fonction de transfert mise en évidence est comparable à celle obtenue avec une configuration Mach-Zehnder à base de SOA²⁰³. Dans ces conditions, il semble que le NOLM soit le plus attractif des régénérateurs interférométriques (fonctionnant à des débits ≤ 40 Gbit/s), puisqu'il ne nécessite qu'un seul SOA.

Cette fonction optique possède des qualités régénératives qu'il convient d'exploiter. La réalisation du NOLM devra être améliorée pour diminuer encore sa sensibilité aux perturbations extérieures. Il devra être étudié à des débits supérieurs (dans un premier temps à 40 Gbit/s).

Les résultats obtenus pour la régénération du format NRZ s'avèrent très intéressants pour les applications à 10 Gbit/s²⁰⁴ telles que la conversion de longueur d'onde dans les nœuds de routage des réseaux métropolitains. L'étude devra aussi être poursuivie pour les débits supérieurs.

Enfin, l'étude que nous avons réalisée en boucle à recirculation indique que l'on peut cascader plus de 400 régénérateurs à 10 Gbit/s²⁰⁵. Il semble maintenant important de régler les problèmes de format de modulation RZ dans le régénérateur complet, pour que les points de fonctionnement en boucle déployée correspondent à ceux en boucle à recirculation.

Il semble aussi important de faire fonctionner le régénérateur en configuration 2R pour mettre en avant la polyvalence des fonctions optiques à base de SOA que nous avons étudiées (conversion de format et transparence aux débits en dessous de 40 Gbit/s).

Nous avons de plus, mis en évidence que la mesure du facteur Q et le taux d'erreurs binaires n'étaient plus corrélés dans le cadre des transmissions utilisant des fonctions optiques non-linéaires. Il est important de rappeler que ce résultat est d'autant plus vrai que la fonction de transfert du régénérateur est abrupte.

Nous avons aussi suggéré qu'une mauvaise position du seuil de décision optique du régénérateur par rapport au signal d'entrée allait générer une distorsion importante du bruit optique sur les données, traduite sur le récepteur par un grand nombre d'erreurs.

Nous pouvons aussi signaler que la complexité de l'opération de récupération d'horloge, en boucle à recirculation, au niveau du régénérateur (détection, filtrage et amplification de la sinusoïde électrique pour moduler le laser), devrait aussi être revue et améliorée.

Il semble important dans ces conditions, de revoir nos fonctions optiques pour les rendre moins sensibles aux variations de puissance mais aussi aux variations de formats de modulation entrée / sortie. Ce travail est d'ores et déjà poursuivi au laboratoire pour obtenir un régénérateur 3R (dans un premier temps) permettant de réaliser des transmissions qui ne seront plus limitées par les dégradations optiques.

Bibliographie du Chapitre 4

-
- ¹⁷² J. Yu, A. Clausen, H.N. Poulsen, X. Zheng, C. Peucheret and P. Jeppesen, « 40Gbit/s wavelength conversion in cascade of SOA and NOLM and demonstration of extinction ratio improvement », *Electronics Letters*, Vol. 36 (11), 2000
- ¹⁷³ A.E. Kelly, « Ultra high-speed wavelength conversion and regeneration using semiconductor optical amplifier », *Proc. OFC*, MB1.1, 2001
- ¹⁷⁴ R. Schnabel, W. Pieper, M. Ehrhardt, M. Eiselt and H.G. Weber, «Wavelength conversion and switching of high speed data signals using semiconductor laser amplifier », *Electronics Letters*, Vol. 29 (23), 1993
- ¹⁷⁵ M.F.C. Stephens, R.V. Penty and I.H. White, « All-optical regeneration and wavelength conversion in an integrated semiconductor optical amplifier / distributed-feedback laser », *Photonics Technology Letters*, Vol.11 (8), 1999
- ¹⁷⁶ N.A. Olsson and R.M. Posen, « Two-stage high-gain amplifier », *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 7 (5), 1989
- ¹⁷⁷ L.H. Spiekman & al, J.M. Wiesenfeld & al, « Recent advances in WDM applications of semiconductor optical amplifiers », *Proc. ECOC*, 2000
- ¹⁷⁸ M. Saitoh, B. Ma and Y. Nakano, « Static and dynamic characteristics analysis of all optical wavelength conversion using directionally coupled semiconductor optical amplifier », *Journal of Quantum Electronics*, Vol. 36 (8), 2000
- ¹⁷⁹ A.E. Kelly, I.D. Phillips, R.J. Manning, A.D. Ellis, D. Nasset, D.G. Moodie and R. Kashyap, « 80 Gbit/s all-optical regenerative wavelength conversion using semiconductor optical amplifier based interferometer » ; *Electronics Letters*, Vol. 35 (17), 1999
- ¹⁸⁰ M. Tsurusawa, R. Inohara, K. Nishimura and M. Usami, « Bit-rate tunable all-optical regeneration by SOA-based polarisation discriminated switch using variable differential group delay generator », *Proc. ECOC*, We.7.3.3,2002
- ¹⁸¹ M.W.K. Mak, H.K. Tsang and K. Chan, « Widely tunable polarization-independent all optical wavelength converter using a semiconductor optical amplifier », *Photonics Technology Letters*, Vol.12 (5), 2000
- ¹⁸² J. Mørk, A. Mecozzi, « Theory of the ultrafast optical response of active semiconductor waveguides », *J. Opt. Soc. Am. B*, Vol. 13 (8), 1996
- ¹⁸³ D. Mahgerefteh, P. Cho, J. Goldhar and G. L. Burdge, « Technique for suppression of pattern dependence in a semiconductor-optical-amplifier wavelength converter », *Photonics Technology Letters*, Vol.9 (12), 1997

-
- ¹⁸⁴ N.S. Bergano, F.W. Kerfoot and C.R. Davidson, « Margin measurement in optical amplifier systems », *Photonics Technology Letters*, Vol.5 (3), 1993
- ¹⁸⁵ J. C. Simon, L. Lablonde, I. Valiente, L. Billès and P. Lamouler, « Two-stage wavelength converter with improved extinction ratio », *OFC Postdeadline Paper*, PD15-2, San Jose, 1995
- ¹⁸⁶ D. Wolfson, A. Kloch and T. Fjelde, « Detailed investigation of cascability of SOA-based gate for all-optical switching », *Proc ECOC*, 2000
- ¹⁸⁷ B. Lavigne, D. Chiaroni, L. Hamon, C. Janz and A. Jourdan, « Performance and system margins at 10 Gbit/s of an optical repeater for long-haul NRZ transmission », *Proc. ECOC*, 1998
- ¹⁸⁸ M. Eiselt, W. Pieper and H.G. Weber, « SLALOM : Semiconductor Laser Amplifier in a Loop Mirror », *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 13 (10), 1995
- ¹⁸⁹ S. Kawanishi, « Ultrahigh-speed optical time division multiplexed transmission technology based on optical signal processing », *Journal of Quantum Electronics*, Vol. 34 (11), 1998
- ¹⁹⁰ B.E. Olsson and P.A. Andrekson, « Noise filtering with the nonlinear loop mirror », *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 13 (2), 1995
- ¹⁹¹ K.R. Tamura, M. Nakazawa, « A polarisation-maintaining pedestal-free femtosecond pulse compressor incorporating an ultrafast dispersion imbalanced nonlinear loop mirror », *Photonics Technology Letters*, Vol.13 (5), 2001
- ¹⁹² R.J. Manning, A.E. Kelly, A.J. Poustie and K.J. Blow, « Wavelength dependence of switching contrast ratio of semiconductor optical amplifier-based nonlinear loop mirror », *Electronics Letters*, Vol. 34 (9), 1998
- ¹⁹³ F. Mogensen, B. Pedersen and B. Nielsen, « New polarisation-insensitive and robust all-fibre-optic interferometer for FM to AM conversion in optical communication », *Electronics Letters*, Vol. 29 (16), 1993
- ¹⁹⁴ K. Uchiyama, H. Takara, S. Kawanishi, T. Morioka and M. Saruwatari, « Ultrafast polarisation-independent all-optical switching using a polarisation diversity scheme in the nonlinear optical loop mirror », *Electronics Letters*, Vol. 28 (20), 1992
- ¹⁹⁵ J-C Simon, L. Bramerie, F. Ginovart, V. Roncin, M. Gay, S. Fève, E. Le Cren, M-L. Charès, « All Optical regeneration techniques », *Ann. Télécommun.*, Vol. 58 (11-12), 2003
- ¹⁹⁶ M. Suzuki, H. Toda, « Q-factor improvement in a jitter limited optical RZ system using nonlinearity of normal dispersion fiber placed at receiver », *Proc. OFC*, WH3-1, 2001
- ¹⁹⁷ M. Meissner, M. Rösch, B. Shmauss and G. Leuchs, « 12dB noise reduction by NOLM-based 2R regenerator », *Photonics Technology Letters*, Vol.15 (9), 2003
- ¹⁹⁸ D. Wolfson, T.Fjelde, A. Kloch, C. Janz, A. Coquelin, I. Guillemot, F. Gaborit, F. Poingt and M. Renaud, « Experimental investigation at 10 Gb/s of the noise suppression capabilities in pass-through configuration in SOA-based interferometric structures », *Photonics Technology Letters*, Vol.12 (7), 2000
- ¹⁹⁹ B. Mikkelsen, S.L. Danielsen, C. Joergensen, R.J.S. Pedersen, H.N. Poulsen and K.E. Stubkjaer, « All-optical noise reduction capability of interferometric wavelength converters », *Electronics Letters*, Vol. 32 (6), 1996

- ²⁰⁰ N.S. Bergano, C.R. Davidson, « circulating loop transmission experiment for the study of long-haul transmission systems using erbium-doped fiber amplifiers », *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 13 (5), 1995
- ²⁰¹ W.A. Pender, P.J. Watkinson, E.J. Greer and A.D. Ellis, « 10Gbit/s optical régénération », *Electronics Letters*, Vol. 31 (18), 1995
- ²⁰² B. Lavigne, D. Chiaroni, L. Hamon, C. Janz and A. Jourdan, « Experimental analysis of SOA-based 2R and 3R optical regeneration for future WDM networks », *Proc. OFC*, 1998
- ²⁰³ G. Morthier, M. Zhao, B. Vanderhaegen and R. Baets, « Experimental demonstration of an all optical 2R regenerator with adjustable decision threshold and ‘true’ regeneration characteristics », *Photonics Technology Letters*, Vol.12 (11), 2000
- ²⁰⁴ J.Y. Emery & al, B. Lavigne & al, « Optimised 2-R all-optical regenerator with low polarisation sensitivity penalty (<1dB) for optical networking applications », *Proc. OFC*, MB4-1, 2001
- ²⁰⁵ B. Lavigne, P. Guerber, D. Chiaroni, C. Janz, A. Jourdan, B. Sartorius, C. Bornholdt, M. Mörhle, « Test at 10 Gbit/s using an optical 3R regenerator using an integrated all-optical clock recovery », *Proc. ECOC*, 1999

Conclusion et perspectives

Le contexte d'étude et les objectifs de la thèse sont clairement reliés à l'augmentation des débits des transmissions sur fibre optique. Les connaissances et les moyens internes au laboratoire d'Optronique de l'ENSSAT ont privilégié l'étude et la réalisation de fonctions optiques à base de semi-conducteurs.

Nous avons largement parlé du potentiel de telles fonctions pour les applications à la régénération du signal et en particulier celui des interféromètres non-linéaires.

Ainsi, au cours de la thèse, nous avons privilégié l'étude de fonctions optiques susceptibles de réaliser des opérations de régénération du signal de qualité, suffisante pour imaginer les introduire à terme dans des systèmes tout-optiques.

Nous avons aussi insisté sur le caractère original de l'architecture des fonctions avec d'une part le Double-Etage de SOA et d'autre part le NOLM-SOA en réflexion.

Le point commun de ces deux fonctions, est l'utilisation d'amplificateurs optiques à semi-conducteurs en régime de conversion de longueur d'onde.

Nous avons alors simulé le fonctionnement de ces fonctions pour essayer de mettre en évidence leur potentiel régénératif, à savoir l'amélioration du taux d'extinction et la réduction du bruit.

Expérimentalement, nous avons testé ces deux fonctions dans un environnement système pour des formats de transmission différents (RZ et NRZ) et pour les configurations 2R et 3R.

Il en ressort, comme l'a prévu la simulation, que le signal en sortie des régénérateurs possède les qualités compatibles avec les exigences des réseaux de télécommunications optiques (taux d'extinction ≥ 10 dB et bon rapport signal sur bruit optique dû à la conversion des données sur une porteuse optique « propre »).

Nous avons aussi mis en évidence la faible sensibilité des dispositifs considérés, aux dégradations optiques en entrée, leur conférant une qualité régénérative d'autant plus importante que le signal incident est dégradé.

L'étude que nous devons réaliser concerne l'optimisation du régime de fonctionnement des régénérateurs tout-optiques, à savoir leur position dans la ligne de transmission et le niveau de dégradation en entrée, pour que leur action soit optimale²⁰⁶.

La réalisation prochaine au laboratoire d'une boucle à recirculation à pas variable, va permettre d'explorer cette voie.

Nous avons de plus réalisé des fonctions optiques relativement stables permettant d'être étudiées dans des systèmes réels. Au cours de cette thèse à vocation industrielle, nous souhaitons rester au plus près des considérations propres aux opérateurs de télécommunications optiques.

Les résultats expérimentaux obtenus en boucle à recirculation (système de simulation des transmissions longues distance en laboratoire) ont été obtenus sans pour autant être concluants. Ces expériences seront reprises prochainement pour être améliorées et permettre une caractérisation complète de la régénération avec nos fonctions optiques.

Plusieurs considérations de fond sur la régénération qui ont été introduites au cours de la thèse, tendent à montrer que l'utilisation des régénérateurs dans les systèmes peut améliorer le signal, sans toutefois que cela ne se traduise par une diminution du taux d'erreurs à la réception. Il est important de rappeler que les fonctions optiques non-linéaires transforment les distributions du bruit optique sur les données et que le détecteur d'erreurs fixe les erreurs. Il est essentiel pour comparer la régénération tout-optique et la régénération opto-électronique, de réussir à quantifier les dégradations du signal lors de la transmission et les limitations de chacun des dispositifs pour mettre en valeur évidence l'intérêt d'utiliser tel ou tel type de régénérateur.

L'autre volet de la thèse est la caractérisation des techniques de remise en forme d'impulsions courtes pour les systèmes à très hauts débits (40 Gbit/s et plus).

L'objectif de ce travail était de faciliter le multiplexage temporel optique des données en minimisant l'interférence entre symboles, génératrice d'instabilités sur le signal à transmettre.

Nous avons développé une technique de mesure originale, de la forme et de la durée de l'enveloppe des impulsions courtes. Cette technique est complémentaire aux techniques de mesure d'impulsions courtes déjà existantes. Elle est mise en œuvre avec des outils standards des systèmes de télécommunications à 10 Gbit/s. Les résultats obtenus ont été validés expérimentalement et présentés dans cette thèse.

Cette méthode nous a permis d'étudier une technique connue de remise en forme des impulsions par mélange à quatre ondes dans les amplificateurs à semi-conducteurs²⁰⁷.

Nous avons alors pu mettre en évidence l'amélioration du taux d'extinction des impulsions et nous convaincre de la pertinence de cette technique pour faciliter le multiplexage temporel des signaux optiques.

Le faible rendement du mélange à quatre ondes ne nous a pas permis d'exploiter cette technique du fait des faibles niveaux de signal obtenus. Dans ces conditions, l'amplification optique va dégrader le signal par accumulation de bruit optique en excès.

Nous avons, au travers de l'étude des fonctions optiques à base de SOA, pour la régénération, abordé différents aspects des télécommunications optiques (propagation, effets non-linéaires, traitement du signal et réseaux), des considérations de physique des matériaux et d'électronique.

Les grands principes de la régénération doivent encore être étudiés, les architectures des régénérateurs doivent être développées pour imaginer voir les premières fonctions optiques non-linéaires dans les réseaux.

²⁰⁶ Y. Hashimoto, R. Kuribayashi, S. Nakamura, K. Tajima, I. Ogura, « Transmission at 40 Gb/s with a semiconductor-based optical 3R regenerator », *Proc. ECOC*, Rimini (Italy), Mo.4.3.3, 2003

²⁰⁷ C. Gosset, G.H. Duan, « Extinction ratio improvement and wavelength conversion based on four-wave mixing in a semiconductor amplifier », *Photonics Technology Letters*, Vol. 13, February 2001

Annexe 1

Caractérisation de la source S_1 (module OPTO⁺ 6685-M1)

Les branchements du dispositif (« chip ») relatifs à l'alimentation en courant et au contrôle en température sont présentés sur la Figure 123.

Les coefficients de Steinhart à rentrer en consigne pour la régulation de la température pour ce type du module (Alcatel) sont :

$$C_1 = 1,125.10^{-3}$$

$$C_2 = 2,347.10^{-4}$$

$$C_3 = 0,853.10^{-7}$$

L'alimentation en courant est connectée à l'entrée « LASER+ ». Le courant injecté est modulé avec une certaine profondeur de modulation, autour d'une valeur moyenne (I_{pol}).

L'amplitude de la modulation est définie sur une résistance de charge de 50Ω (directement lue sur un oscilloscope d'impédance 50Ω), par une puissance électrique P_{RF} .

Nous notons I_{RF} le courant modulé injecté dans le laser :

$$I_{RF} = \sqrt{\frac{P_{RF}}{R_{charge}}} = \frac{V_{RMS}^2}{R_{charge}} \quad \text{avec } V_{RMS} = \frac{V_{pp}}{2\sqrt{2}}$$

V_{pp} est la tension « pic to pic » lue à l'oscilloscope.

P_{RF} est exprimée en mW dans l'expression, mais couramment utilisé en dBm.

$$P_{RF} \text{ (dBm)} = 10. \log \left(\frac{P_{RF} \text{ (mW)}}{1 \text{ mW}} \right)$$