

Analyse de la stabilité d'horloge et récupération d'horloge

Nous avons présenté dans le chapitre précédent un procédé simple de filtrage de raies spectrales. Les signaux proposés apparaissent stables et propres. Nous proposons alors d'une part de confirmer la stabilité des horloges par une mesure du taux d'erreur et d'autre part d'utiliser ces signaux pour faire de la récupération d'horloge.

Nous présenterons dans une première partie l'intérêt, le principe et les résultats des mesures du taux d'erreurs binaire tandis que la seconde partie traitera de la récupération d'horloge. Nous montrerons dans ce chapitre la capacité d'un laser à blocage de modes à générer une horloge de fréquence f à partir d'une horloge de fréquence $N \times f$. Cette fonction de base est essentielle pour les réseaux à $N \times 100$ Gbits/s.

6.1 Mesure du taux d'erreurs

Afin de vérifier la stabilité de nos horloges, nous avons pensé nous orienter vers la mesure du taux d'erreur binaire. Il s'agit d'un facteur utilisé couramment pour tester la qualité d'une transmission, en reportant le rapport entre le nombre de bits erronés et le nombre de bits émis.

En effet, un signal, codé en bit/s, est vu par le récepteur comme une succession de symboles binaires 1 ou 0 suivant le niveau d'amplitude. Pour cela, on définit un seuil de décision au dessus duquel le signal sera vu comme un 1 et en dessous comme un 0. Or, des erreurs peuvent être commises si les fluctuations d'amplitude et temporelles sont trop importantes.

Dans le cas de nos horloges, il faut d'abord effectué un codage pour avoir des données de type 1 ou 0 ce qui transforme le GHz en GBit/s. Nous verrons donc dans un premier temps les étapes de cette mesure avant de montrer les résultats obtenus.

6.1.1 Principe de la mesure

Afin d'avoir une comparaison, nous disposons d'une mesure prise avec un signal dont nous sommes sûrs de sa stabilité. La figure 6.1 présente le schéma expérimental de la mesure du taux d'erreur binaire de cette référence. Il s'agit d'un multiplexage optique temporel¹ de 42,7 Gbit/s vers 170,8 Gbit/s du signal à 42,7 GHz issu du laser à bâtonnets quantiques et modulé à 42,7 Gbit/s. À la réception, le signal est démultiplexé optiquement vers 42,7 Gbit/s à l'aide d'un modulateur à électro-absorption puis analysé dans un récepteur classique.

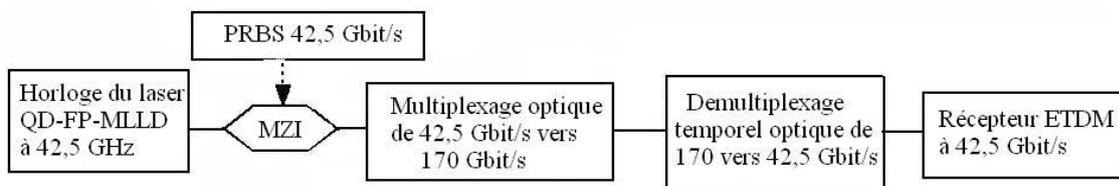


FIGURE 6.1 – Principe de la mesure du taux d'erreur binaire pour la référence.
La référence est créée par un multiplexage optique du signal issu du laser à bâtonnet quantique.

Dans le cas de notre horloge générée à 170 GHz, le principe de la mesure est représenté sur la figure 6.2. L'horloge est d'abord codée à 42,5 Gbit/s. À la réception, le même procédé que pour la référence est utilisé : le démultiplexage optique donne 4 trains à 42,5 Gbit/s et l'une de ces séquences correctement modulée est analysée par le récepteur ETDM.

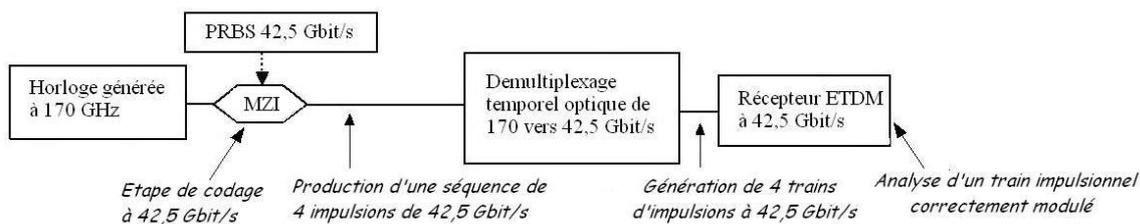


FIGURE 6.2 – Principe de la mesure du taux d'erreur binaire pour l'horloge générée.

La figure 6.3 montre le diagramme de l'oeil du signal obtenu après ce codage et utilisé pour l'émission. Compte tenu du rapport quatre entre le débit de codage et le taux de répétition de l'horloge, idéalement la séquence est quadruplée par rapport à la séquence d'origine. Cependant, les temps de montée et de descente du modulateur 42,5 Gbit/s ferment

1. Le multiplexage temporel repose sur l'utilisation de coupleurs et de lignes à retard afin de multiplier le débit initial d'une source laser impulsionnel.

deux des quatre impulsions du diagramme de l'oeil.

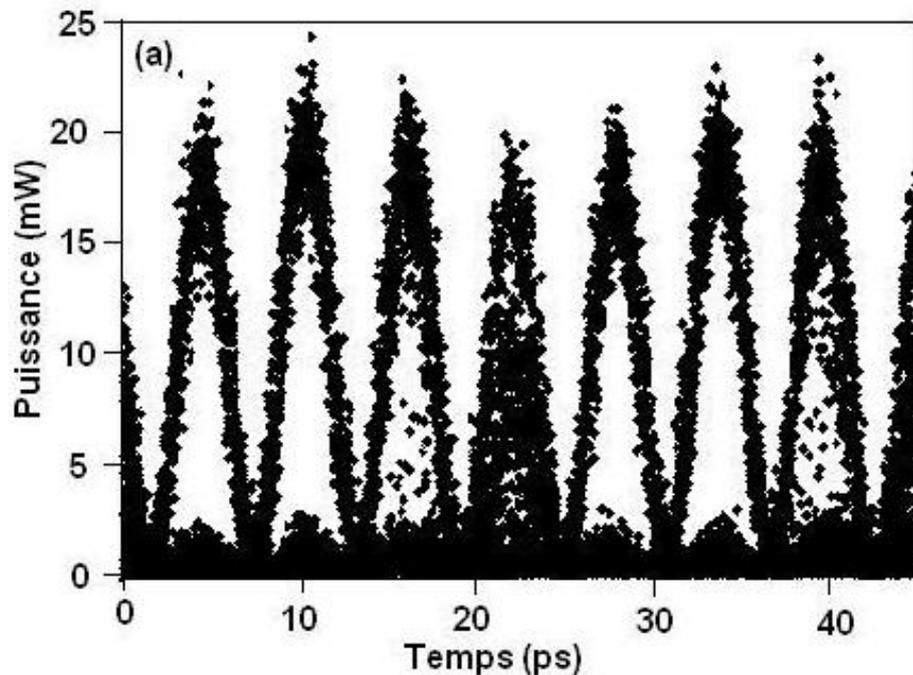


FIGURE 6.3 – Diagramme de l'oeil obtenu après codage de l'horloge à 42,5 Gbit/s. Séquence de 4 impulsions se répétant périodiquement : deux sont sans bruit, une est partiellement bruitée et la dernière est fermée.

6.1.2 Résultats de la mesure pour l'horloge à 170,8 GHz générée avec les réseaux de Bragg

La figure 6.4 représente le tracé du taux d'erreur binaire en fonction de la puissance injectée sur le récepteur. La courbe verte est le résultat pour l'horloge générée à 170,8 GHz tandis que le tracé en bleu est la mesure obtenue pour le signal nous servant de référence.

Nous constatons alors que les deux courbes sont presque superposées. Ainsi, l'utilisation de l'horloge à 170,8 GHz n'ajoute aucune pénalité comparé à l'utilisation d'un signal issu du multiplexage optique des impulsions émis en sortie du laser QD. Cette mesure confirme la stabilité de notre horloge en terme de bruit de partition et de gigue temporelle.

6.1.3 Résultat pour des horloges générées à l'aide du filtre programmable

Nous utilisons le même principe que précédemment afin de vérifier la stabilité de notre système. Le résultat de la mesure correspond à la courbe rouge visible sur la figure 6.4 et ceci valide le fait que les deux filtrages sont similaires puisque les courbes sont superposées.

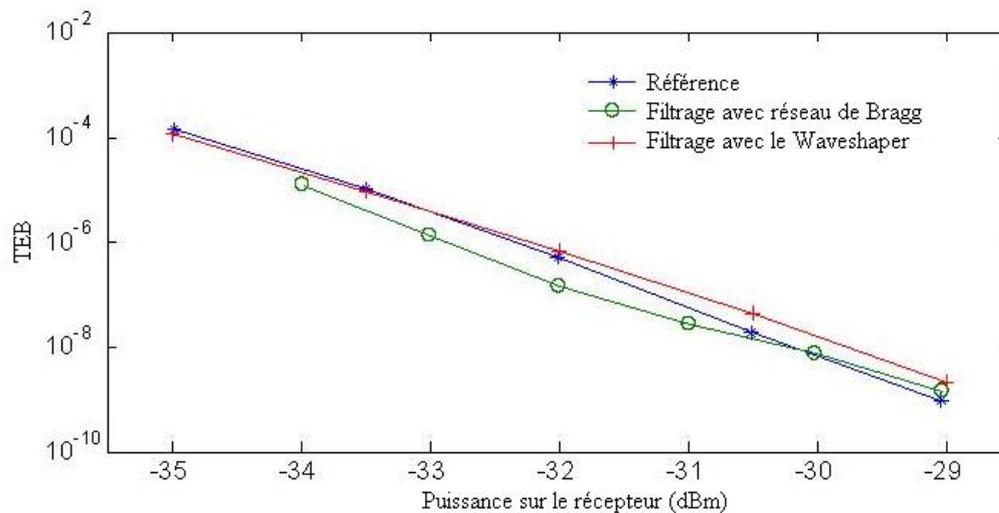


FIGURE 6.4 – Résultats de la mesure du taux d'erreur binaire

Aucune pénalité n'est visible par rapport à la référence prise avec le signal du laser à bâtonnets quantiques.

Le réglage de l'ensemble des paramètres afin d'obtenir une mesure valable demande beaucoup de temps déjà à 170 GHz ; c'est pourquoi nous n'avons pas fait de mesures à plus haut-débit.

6.2 Récupération d'horloge

Nous disposons de signaux à différentes fréquences et nous nous proposons de voir s'il est possible de récupérer un signal à 42,7 GHz à partir d'un train d'impulsion à $N \times 42,7$ GHz. Nous allons expliquer ci-dessous le principe du montage utilisé et donner les résultats obtenus.

6.2.1 Présentation de l'expérience

Le principe de l'expérience est présenté sur la figure 6.5. Il se décompose en trois blocs dont on va par la suite expliquer le fonctionnement. Le but est de montrer la capacité d'un laser à bâtonnets quantiques à générer une horloge à 42,7 GHz à partir d'un train impulsionnel à $N \times 42,7$ GHz.

6.2.1.1 Génération d'un train impulsionnel accordable

Le premier bloc consiste à générer un train impulsionnel dont la fréquence est un multiple de 42,7 GHz. Pour cela, nous utilisons la méthode du filtrage spectral (expliquée au

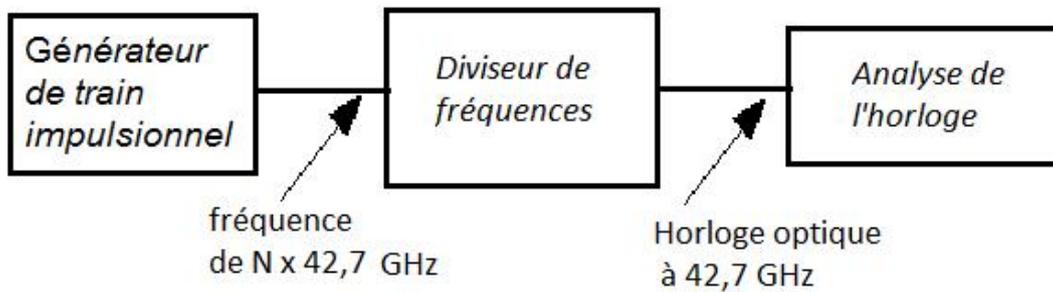


FIGURE 6.5 – Schéma expérimental de la division de fréquences.

chapitre 5).

Le filtrage est réalisé à l'aide du filtre programmable afin de générer des horloges à différents fréquences (égales à $N \times 42,7 \text{ GHz}$) en sélectionnant trois raies spectrales. Nous notons ici que les raies lasers se trouvant à la fréquence du laser (42,7 GHz) sont réduites de 40 dB. Nous rappelons également que ce laser QD opère autour de 1550 nm.

L'horloge optique récupérée en sortie de ce bloc est le signal envoyé dans le bloc de récupération d'horloge par division de fréquences.

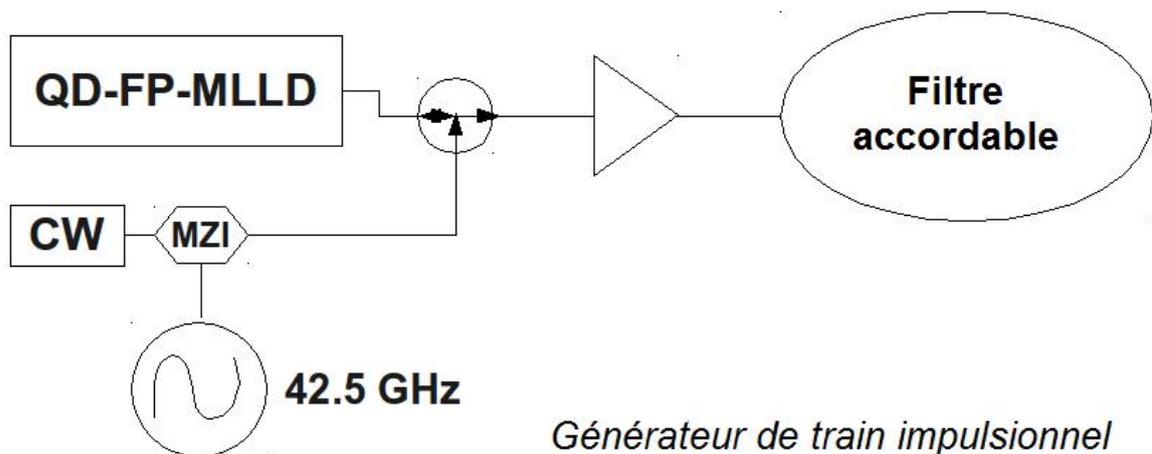


FIGURE 6.6 – Schéma expérimental du bloc de génération de train impulsif de fréquences accordables.

6.2.1.2 Division de fréquences

Comme le montre la figure 6.7, le bloc du diviseur de fréquences, noté AO-FDCR pour « All Optical Frequency Down-Conversion Clock Recovery », se compose d'un second laser QD-FP-MLLD avec une longueur d'onde d'émission centrale autour de 1570 nm suivi d'un filtre optique. Ce filtre a pour rôle d'éliminer les résidus du train d'impulsions à la fréquence $N \times 42,7$ GHz. En jouant sur la température et le courant d'alimentation du laser, nous pouvons ajuster le réglage de la fréquence de répétition au plus près de 42,7 GHz.

Il n'y a donc pas de verrouillage de fréquence pour ce second laser et la mise en phase à 42,7 GHz se réalise suivant deux processus : le milieu de gain a une surmodulation à $N \times 42,7$ GHz qui met en phase des modes séparés de $N \times 42,7$ GHz. La mise en phase à 42,7 GHz est alors lié au mélange d'ondes fortement présent dans ces structures. De plus, l'injection du train impulsional se fait en bord de bande du second laser.

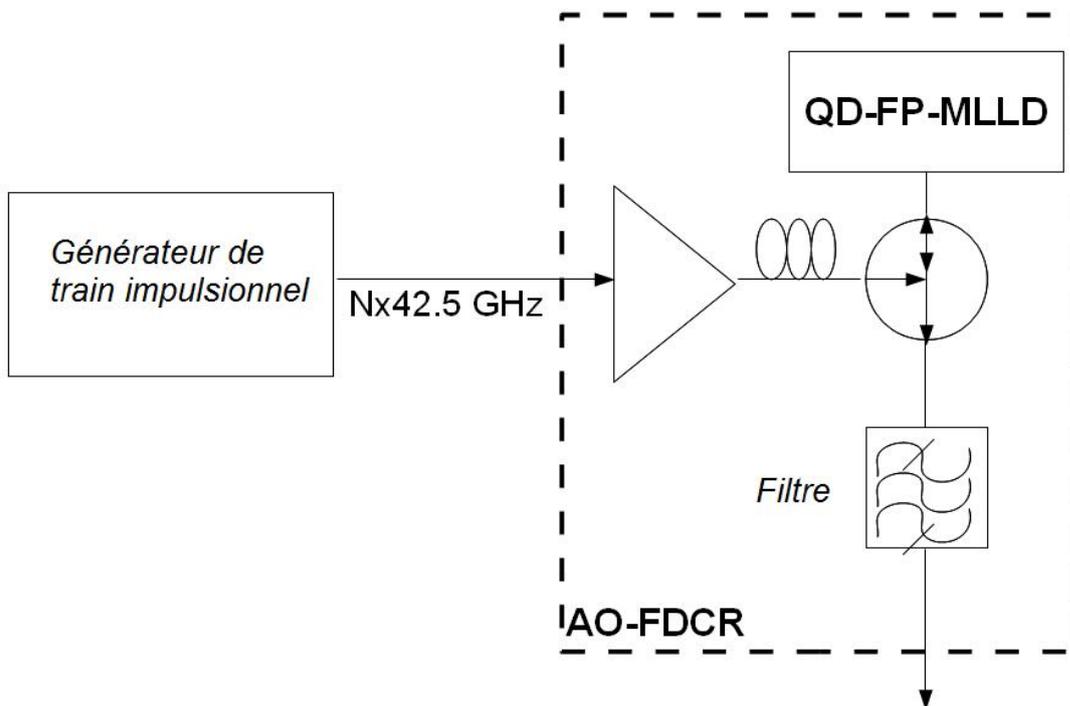


FIGURE 6.7 – Schéma expérimental du bloc de division de fréquences.

Ainsi, quand un train d'impulsions à $N \times 42,7$ GHz est injecté, nous récupérons une horloge à 42,7 GHz autour de 1570 nm. Cette horloge doit être analysée pour vérifier sa stabilité.

6.2.1.3 Analyse de l'horloge

La composition du bloc d'analyse est présentée sur la figure 6.8. Une fois récupérée, l'horloge à 42,5 GHz est modulée à 42,7 Gbit/s pour l'évaluation de ce système. Pour cela, on utilise une séquence de données pseudo-aléatoire (PRBS) à 42,7 Gbit/s dans un modulateur de type Mach-Zehnder (MZI). Une ligne à retard optique, placée avant le modulateur, permet le réglage fin de la fenêtre temporelle de données utilisées.

Enfin, la sortie du modulateur est directement reliée au système de mesure du taux d'erreurs binaires, ce qui permettra de vérifier que la division de fréquence a bien eu lieu.

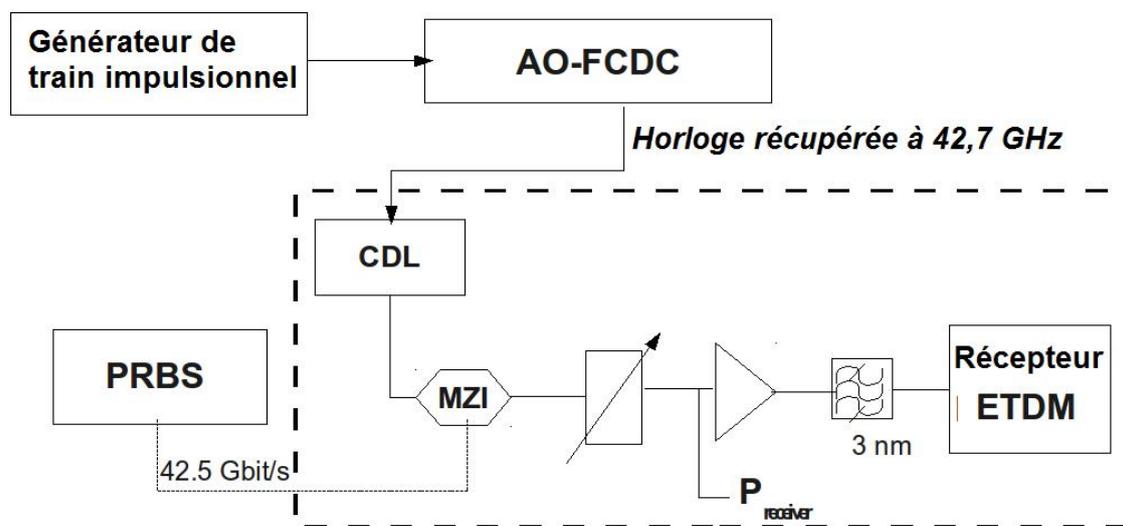


FIGURE 6.8 – Schéma expérimental du bloc d'analyse.

6.2.2 Résultats expérimentaux

Le filtrage spectral a été réalisé avec 3 lignes spectrales pour des fréquences variant de 42,7 à 427 GHz par pas de 85,4 GHz. Un exemple de spectre et de trace temporelle est présenté sur la figure 6.9. Enfin, le courant du laser dans l'OCR doit être optimisé pour chaque fréquence afin de récupérer l'horloge avec précision.

Nous notons qu'aucune composante résiduelle à 42,7 GHz n'apparaît sur le spectre optique des trains d'impulsions générées par le filtrage (contrairement à la méthode de multiplexage temporel). Ces raies sont de l'ordre de 40 dB plus basses que les raies filtrées. Elles sont donc trop faibles pour que la synchronisation du second laser QD se fasse grâce à elles.

La figure 6.10 représente l'ensemble des mesures du taux d'erreur binaire en fonction de la puissance d'entrée sur le récepteur. La mesure appelée référence correspond au cas où le

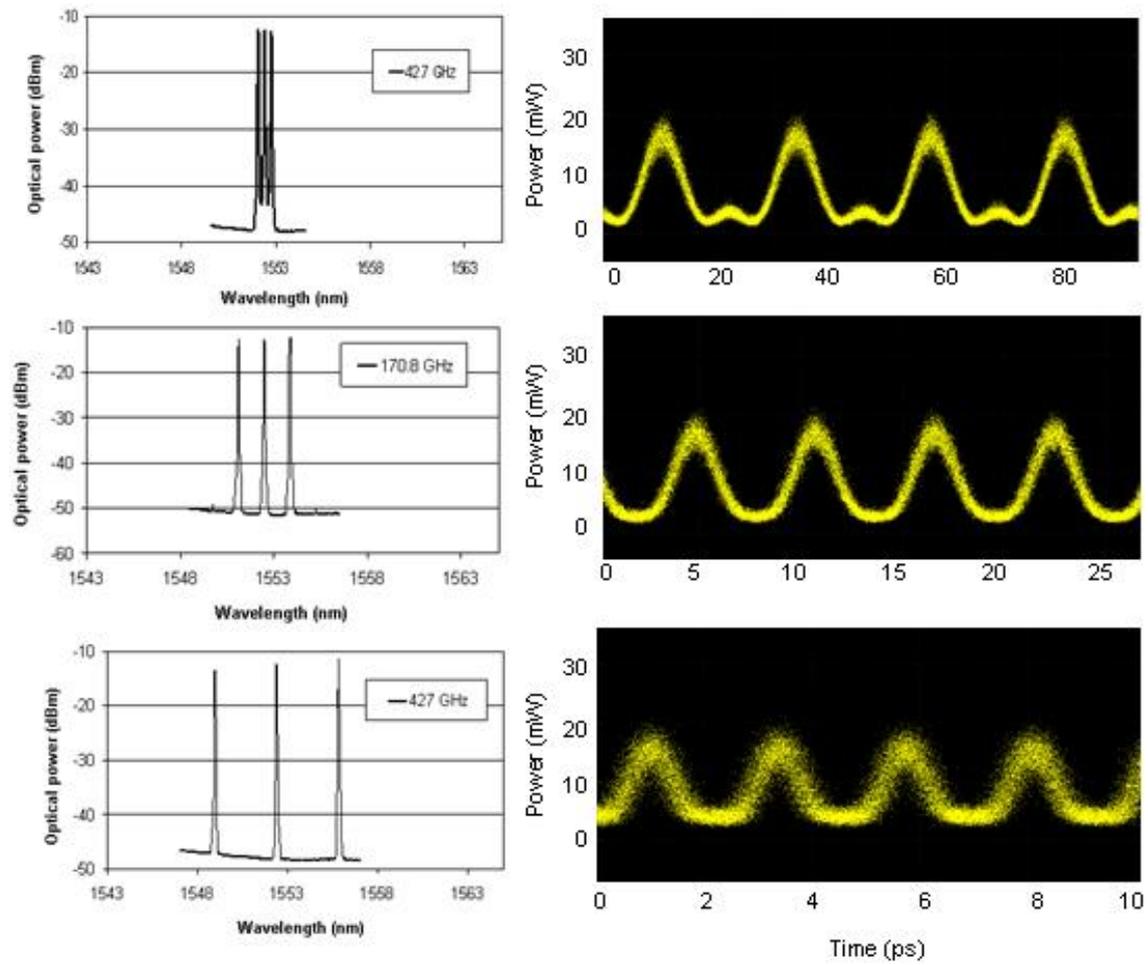


FIGURE 6.9 – Spectre et trace temporelle pour 3 taux de répétition différents : 42,7, 170 et 427 GHz

signal de données à 42,7 Gbit/s est envoyé directement pour la mesure du TEB sans passer par le module de conversion d'horloge. Nous pouvons constater que le système est en mesure de verrouiller tous les signaux avec la même qualité. Une faible pénalité est insérée pour les puissances les plus basses.

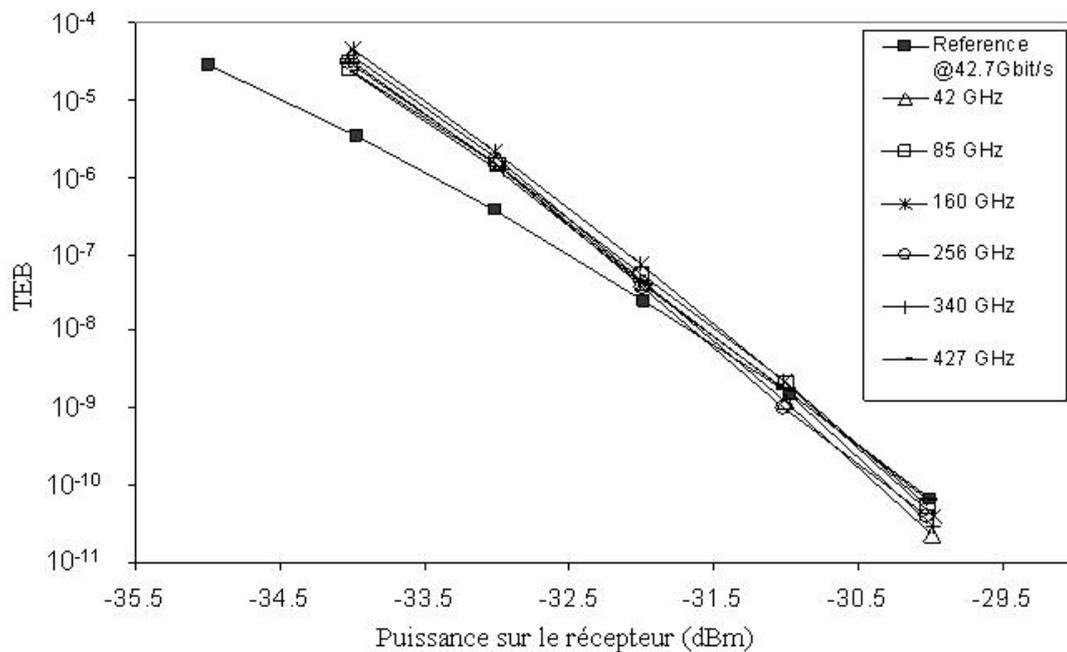


FIGURE 6.10 – Résultats de la mesure du taux d'erreur binaire

6.2.3 Environnement du système

Nous avons voulu tester les performances du bloc AO-FDCR quand un train de données à $N \times 42,7$ Gbit/s est injecté plutôt qu'un signal d'horloge. Le schéma de l'expérience est visible sur la figure 6.11. Le premier laser QD crée des impulsions avec un taux de répétition de 42,7 GHz et une largeur à mi-hauteur de 1,5 ps. Ce train d'impulsions est alors modulé à l'aide d'un modulateur MZI à 42,7 Gbit/s puis on utilise un multiplexage temporel pour obtenir des données à 170 Gbit/s. Le bloc noté BRM (« Bit Rate Multiplier ») permet de multiplier par quatre le débit des données. Dans cette partie, la fréquence est limitée à 170,8 GHz pour des raisons de complexité de réalisation expérimentale et de manque de temps.

La sortie est injectée directement dans le système de diviseur de fréquence (bloc AO-FDCR). Enfin, on retrouve le bloc d'analyse similaire à celui de la partie précédente.

Les résultats sont reportés sur la figure 6.12. Les courbes avec les triangles correspondent aux mesures obtenues dans la partie précédente (sans codage des données). La courbe ayant pour légende 42,7 Gbits correspond au cas où le bloc de multiplication du taux (BRM) n'est

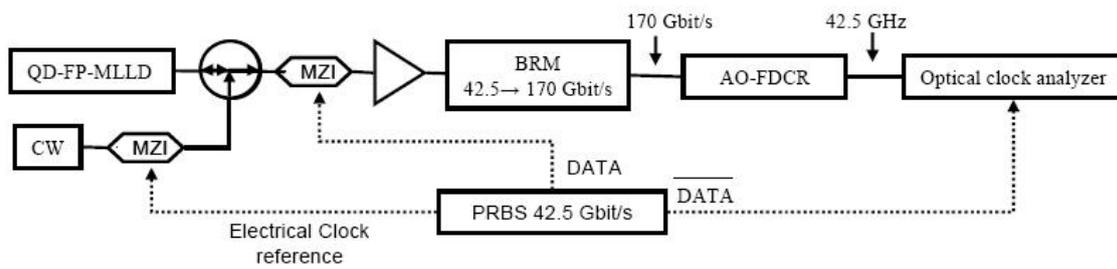


FIGURE 6.11 – Schéma expérimental du test de la récupération d'horloge.
 On précise ici que la fréquence réelle est de 42,7 GHz.

pas employé. Dans le cas de 170,8 GBit/s, nous avons testé deux codages différents pour la séquence pseudo-aléatoire. Nous pouvons voir qu'une pénalité de 0,3 dB est insérée dans le cas où les horloges sont codées au préalable.

On note que moduler à 42,7 GHz suivant un codage PRBS un signal à 170,8 GHz ne génère pas théoriquement de sous harmonique à 42,7 Gbits/s. Expérimentalement, les sous harmoniques sont observées être à -30 dB de la porteuse optique, ce qui porte la puissance disponible dans la sous-harmonique à moins de -40 dBm (ce qui est insuffisant pour verrouiller un laser (thèse d'Olivier Vaudel [93])). On peut donc douter du verrouillage sur un résidu de sous-harmonique. On rappelle que l'on a montré précédemment un verrouillage à la fréquence f sur une horloge à Nxf en l'absence de sous-harmonique.

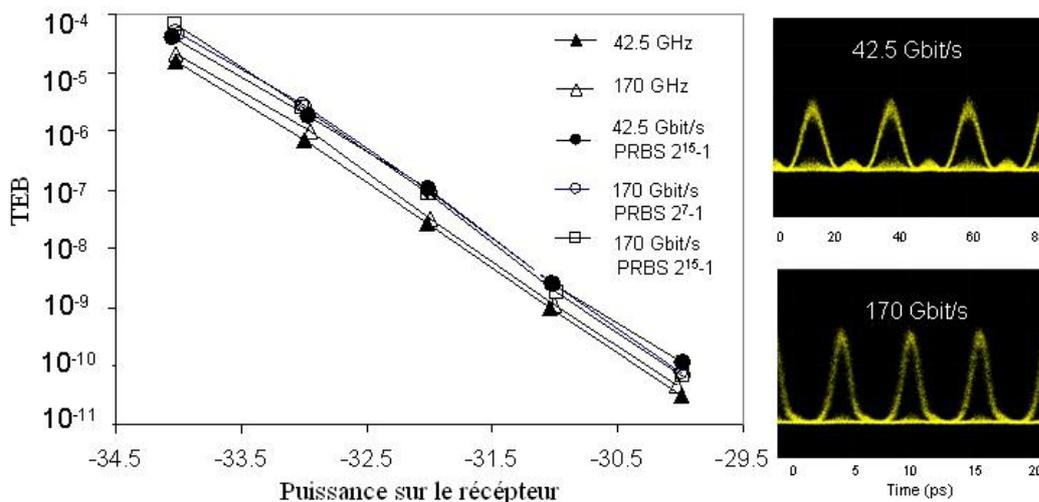


FIGURE 6.12 – Résultats de la mesure du taux d'erreur binaire

6.3 Conclusion

Nous avons pu tester la qualité de nos horloges par la mesure du taux d'erreur. Celle-ci n'a montré qu'aucune pénalité n'était insérée par l'utilisation de la méthode du filtrage spectral pour multiplier le taux de répétition d'un laser QD-FP-MLLD confirmant ainsi la stabilité de nos horloges en terme de bruit et de gigue temporelle.

De plus, nous avons montré l'utilisation des horloges jusqu'à 427 GHz pour effectuer une récupération d'horloge efficace. Aucune pénalité n'a été observée ce qui confirme la qualité de la conversion de fréquences. Ces résultats démontrent également le fort potentiel des lasers à bâtonnets quantiques en blocage de mode actif pour une récupération d'horloge à très haut taux de répétition. Ces résultats ont fait l'objet d'un post-deadline à OFC 2010 [94]

Nous notons ici que le potentiel des laser QD-FP-MLLD pour faire de la récupération d'horloge tout optique a été démontré en 2005 [95]. Cette équipe a démontré que la gigue temporelle mesurée sur l'horloge récupérée était compatible avec les caractéristiques recommandées pour la récupération d'horloge de 40 GHz.

Conclusion de la seconde partie

Dans cette partie, nous nous sommes intéressés à un procédé simple de génération d'horloge. Nous avons d'abord présenté la théorie relative aux réseaux de Bragg ainsi que leur procédé de fabrication avant de montrer une utilisation en tant que filtre spectral. Nous avons pu générer une horloge stable à 341,6 GHz à partir d'un laser à bâtonnets quantiques.

La technique a pu être reproduite aisément grâce à l'utilisation d'un filtre commercial dont nous réglons la forme en fonction de la fréquence désirée et la dispersion. Des horloges terahertz peuvent alors être générées.

L'étude de la stabilité a été initiée mais pour de futures réalisations, ce point méritera d'être approfondi avec notamment une mesure de bruit. Nous avons également proposé un système de division de fréquences des horloges générées. Nous verrons dans la troisième partie quels objectifs on peut viser.

Troisième partie

Perspectives et conclusion

Chapitre 7

Perspectives

7.1 La génération d'horloge Terahertz

Comme nous l'avons dit, ce thème est un sujet d'actualité. Nous pensons que les signaux que nous générons peuvent être un point de départ dans ce domaine pour notre laboratoire. Plusieurs questions méritent d'être posées notamment au niveau de la visualisation, caractérisation et utilisation de ces signaux.

7.1.1 La visualisation

Le procédé de filtrage présenté dans le chapitre 5 ouvre de multiples possibilités pour la création de signaux terahertz. L'utilisation du filtre commercial a permis de valider le procédé de filtrage de raies spectrales et la suite serait alors de créer les réseaux de Bragg adéquates pour différentes horloges.

La question de la visualisation de ces signaux demandent aussi un travail de recherche complémentaire afin de voir les moyens actuellement utilisés et développés par les équipes de recherche pour des signaux atteignant de telles fréquences. En effet, pour le moment, nous avons utilisé un autocorrélateur pour vérifier la fréquence des signaux générés au dessus de 700 GHz.

7.1.2 La caractérisation

Cette phase est implicitement liée à la visualisation. En effet, estimer la stabilité d'un signal n'est faisable que lorsqu'une trace nette est visible. Or, un autocorrélateur n'est pas développé pour de telles mesures et les signaux hautes fréquences apparaissent très souvent bruités. Ceci provient très certainement du bruit généré par les amplificateurs utilisés. Ils restent indispensables puisqu'une certaine puissance est nécessaire au fonctionnement de l'autocorrélateur.

Nous pensons que les mesures de taux d'erreurs sont un premier pas dans la caractérisation des signaux. Nous pensons aussi qu'il serait utile de mesurer le bruit basse-fréquence des horloges. Pour cela, nous disposons d'un banc de mesure expérimental qu'il nous faut dans un premier temps caractériser afin de vérifier son bon fonctionnement. Cette étape n'a pu être faite à l'heure actuelle du fait d'une panne d'un appareil de visualisation.

7.2 Sur les lasers à blocage de mode passif

La première partie de ce manuscrit a mis en avant des expériences classiques pour la génération d'impulsions. Celles-ci ont été faites dans le but de trouver des moyens d'augmenter le débit du train d'impulsions. Cet objectif reste à l'esprit notamment et devra être fait selon les trois directions présentées ci-dessous.

7.2.1 Utilisation des fibres fortement non-linéaire

Des nouvelles fibres sont apparues au cours de ces dernières années et certaines restent encore en plein développement. Les fibres en verre chalcogénure ainsi que les fibres microstructurées présentent des propriétés intéressantes et leur utilisation devient un sujet de plus en plus actif.

Dans les fibres optiques, on définit un coefficient non-linéaire, noté γ dont l'expression prend la forme suivante :

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda_0 A_{eff}} \quad (7-1)$$

Pour améliorer la non-linéarité, on constate donc que l'on peut influencer sur deux paramètres, ce qui nous donne deux pistes différentes que nous allons présenter dans les deux paragraphes ci-dessous.

7.2.1.1 La voie guide d'onde : les fibres microstructurées

Il s'agit ici de confiner le mode sur de très petits diamètres et ainsi de diminuer l'aire effective A_{eff} . C'est ce principe qui est utilisé dans les fibres microstructurées. On a ainsi pu augmenter de près d'un facteur 50 le coefficient non-linéaire d'une fibre standard en silice [96]. On rappelle ici que la valeur du coefficient γ dans la fibre SMF standard est de $1,3W^{-1}m^{-1}$.

Les premières fibres à utiliser le confinement sont les fibres à saut d'indice mais depuis quelques années, on voit se développer la technologie des fibres microstructurées. Il s'agit de fibres en silice pour lesquelles la gaine contient une proportion d'air contrôlable. On les

retrouve sous le nom de fibres à trous ou fibres à cristal photonique. La figure ci-dessous donne un aperçu de différentes structures pour ces fibres.

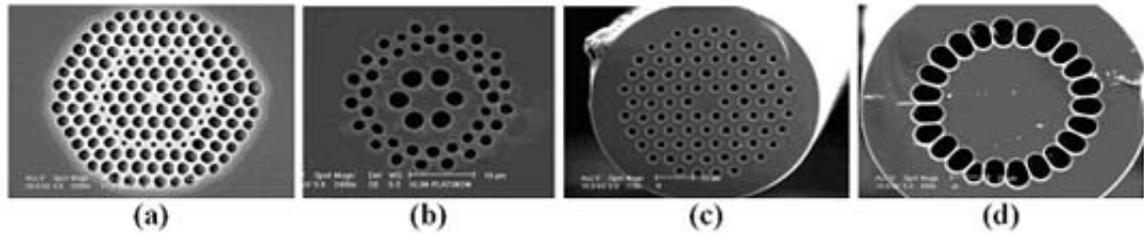


FIGURE 7.1 – Quelques structures de fibre microstructurées.

7.2.1.2 La voie matériau

On cherche dans ce cas des verres dont l'indice de réfraction non-linéaire n_2 est intrasèquement élevé. Le verre de chalcogénure ($Sb_{10}S_{65}Ga_5Ge_{20}Sb_{20}S_{65}Ge_{15}As_2Se_3$ etc) a l'indice le plus élevé [97, 98, 99] mais on trouve aussi le verre de bismuth (Bi_2O_3) pas loin derrière. Les structures de fibres fortement non-linéaires en verre non-silice peuvent être à saut d'indice ou de type microstructurées.

Lors de la fabrication de ce genre de fibres, deux paramètres sont souvent étudiés en plus de la non-linéarité. Il s'agit de la dispersion et des pertes. La valeur de ces dernières doit être réduite pour espérer une bonne propagation tandis que les microstructures permettent d'ajuster le coefficient de dispersion. On va ci-dessous donner quelques détails sur les différents verres utilisés actuellement autre que la silice.

Les verres de bismuth

En changeant le pourcentage du dopage en Bi_2O_3 , on peut ainsi jouer sur l'indice de réfraction et l'indice non-linéaire du composé. La première publication faisant référence à l'utilisation de ce matériau dans les fibres date de 2002 [100]. Il s'agit d'une fibre à saut d'indice dont le coefficient non-linéaire est 50 fois plus grand que celui de la silice (valeur de $64,5W^{-1}km^{-1}$) et une valeur de dispersion de $-130ps/nm/km$. Depuis, en jouant sur le dopage et l'aire effective, une valeur record de $1360W^{-1}km^{-1}$ a été atteinte [101] mais cette fibre présente de très fortes pertes d'épissures.

On retrouve également des fibres microstructurées utilisant le verre de bismuth. La première fibre ainsi réalisée date de 2004 [102] avec un coefficient atteignant tout de même $1100W^{-1}km^{-1}$ et des pertes de $3,4dB/m$.

Les verres de chalcogénure

Il s'agit de verres composés des éléments suivants : As-S, As-SE, Ge-S et Ge-Se [103] ayant un indice de réfraction ainsi qu'un indice de réfraction non-linéaire très élevés. Au vue de leurs caractéristiques non-linéaires très intéressantes, ils ont fait l'objet ces dernières années de nombreuses études mettant en avant leurs applications pour les télécommunications [104, 105].

Du côté des fibres à saut d'indice, de belles performances ont été obtenues avec par exemple [106] un coefficient non-linéaire de $2450 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ obtenu avec la composition suivante As_2Se_3 . L'aire effective de cette fibre est de $40 \mu\text{m}^2$, on peut alors envisager réduire cette valeur afin d'augmenter la non-linéarité. D'autres exemples peuvent être observés dans les références [107, 108, 109, 110].

La possibilité de réaliser des fibres microstructurées en verre chalcogénure a été démontrée pour la première fois en 2000 par Monro et al. [111]. Aucune caractérisation optique de cette fibre n'a été proposée et on ne trouve que très peu de résultats par la suite. Notre laboratoire a collaboré dans le cadre de projets ANR à la caractérisation de nouvelles fibres de ce type, fabriquées par le LVC et PERFOS. Depuis 2005, le coefficient non-linéaire augmente sans cesse. Pour plus d'informations, le lecteur pourra se rapporter à la thèse de Thanh Nam Nguyen soutenue en 2008 [112].

Ainsi, nous avons actuellement à disposition des fibres fortement non-linéaires. Leur caractérisation étant aujourd'hui très complète, nous pensons qu'il serait efficace de voir par une simulation quelles avantages leur utilisation dans un laser à fibre apporterait. La mise en pratique demande un travail supplémentaire car l'injection dans ce type de fibre n'est pas facile puisque les soudures sont impossibles du fait de leur fragilité.

7.2.2 Couplage avec une micro-sphère

Une équipe du laboratoire travaille sur les micro-sphères. Nous pensons qu'il serait intéressant de coupler une cavité laser avec un tel composant.

Une microsphère est une cavité de quelques dizaines de microns de diamètres. A titre d'exemple, la figure 7.2 est une photographie d'une micro-sphère de $480 \mu\text{m}$ de diamètre. Ces structures sont caractérisées par les modes de galeries (« Whispering Gallery Modes » (WGM)). Il s'agit d'une onde qui, en se propageant le long d'une surface fermée (résonateur) revient périodiquement à son point de départ et interfère avec elle même ce qui lui donne des propriétés de phase particulières.

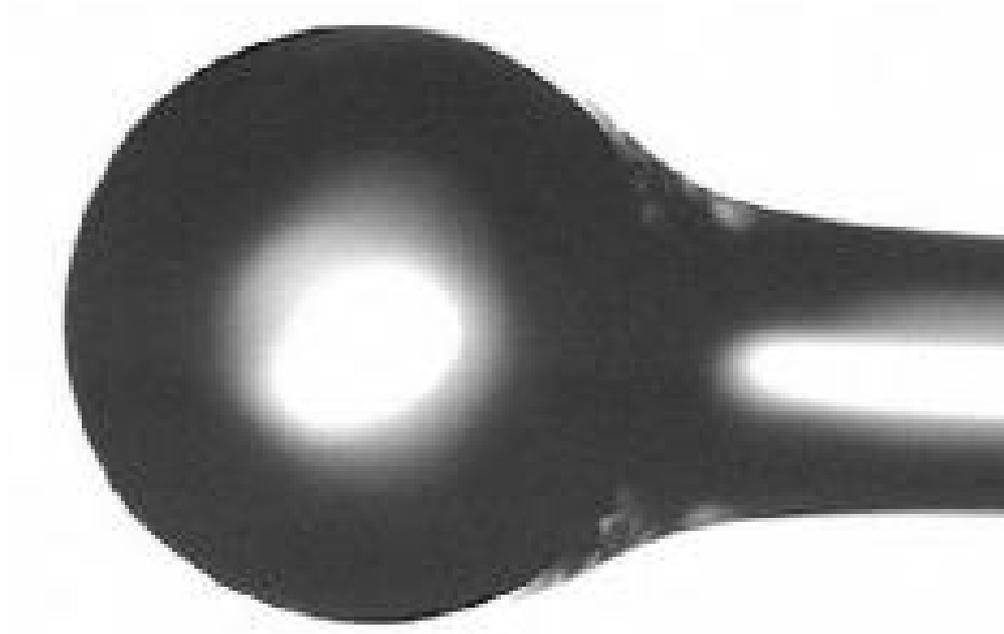


FIGURE 7.2 – Photo d’une micro-sphère de 480μ de diamètre

7.3 Simulation

Par manque de temps, nous n’avons pas pu enrichir nos expériences de simulations concrètes. Néanmoins, un premier travail a été fait dans ce sens. Nous allons détailler les équations ainsi que la méthode de résolution utilisée ci-dessous.

7.3.1 Modélisation de la cavité laser

Nous avons parlé dans le premier chapitre de l’équation non-linéaire de Schrödinger. Celle-ci modélise les effets dispersifs et non-linéaires. De plus, nous avons abordé la méthode de split step Fourier, communément utilisée pour la résolution. Nous disposons d’un programme de simulation pour résoudre cette équation et suivre ainsi l’évolution d’une impulsion lors de sa propagation dans de la fibre.

La modélisation d’une cavité laser peut se faire par le biais du formalisme d’ondes propagatives. Cela consiste à calculer l’évolution du champ laser ainsi que du signal de pompe durant leur propagation dans la cavité résonnante en tenant compte de l’inversion de population et du gain. Nous allons dans les parties suivantes détailler ce formalisme ainsi que la méthode de résolution employée.

Les programmes ont été écrits en langage C mais ils ne sont pas finalisés puisque nous

avons observés des évolutions de la puissance de pompe et du champ incorrectes. Le temps a malheureusement manqué pour revenir à ces simulations mais c'est pourtant un des points essentiels à traiter. On trouvera en annexeannexe B le travail qui a été effectué sur cette partie dans cette thèse.