

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université A/Mira de Béjaïa

Faculté Technologie

Département Genie Electrique



Mémoire de fin de cycle
en vue d'obtention du diplôme de Master
Domaine : Sciences et Technologies
Filière : Télécommunications
spécialité : Réseaux et Télécommunications

Thème

Etude et Simulation de la technique SDM dans les liaisons de télécommunications optiques.

Mémoire soutenu le 11/10/2020 par :

HOCINI Zohra

SAMI Nouara

Devant le jury composé de :

Président M^r *BENAMIROUCHE* Nadir

Encadreur M^r *SAHRAOUI* Walid

M^r *BERRAH* Smail

Examineur M^r *KHIREDDINE* Abdelkrim

Année universitaire : 2019/2020

Remerciements

Au terme de notre formation en générale et notre projet de fin d'étude en Particulier.

Nous tenons tout d'abord à remercier Allah le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force, la patience et la volonté d'accomplir ce Modeste travail.

En second lieu, nous tenons à remercier notre encadrant M^r SAHRAOUI.W, pour l'orientation, la confiance, la patience qui ont constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port.

Nos sincères et chaleureux remerciements à M^r BERRAH.S, pour son aide, son appui moral, et ses qualités humaines.

Nos remerciements vont aussi à M^r BENAMIROUCHE.N et M^r KHIREDINE.A pour avoir accepté d'être les examinateurs de notre thème et pour leur intérêt dans notre travail.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à tous les professeurs qui nous ont enseigné et qui par leurs compétences nous ont soutenu dans la poursuite de nos études.

Enfin, on remercie tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

À ma très chère mère pour m'avoir donné goût aux études et m'avoir apporté un grand support moral tout au long de mes études.

À mon père que dieu le bénisse et le porte dans son paradis.

À mes grands parents.

À ma soeur "Kenza" qui m'a beaucoup aidé et encouragé.

À mon frère "Lounis".

À toute ma famille.

À ma binôme Nouara et sa famille.

À tous mes amis de l'université de Bejaïa.

Et surtout à tous les gens qui m'ont souhaité du bien, du bonheur, de la tranquillité, du succès, de la réussite et de l'évolution dans ma vie personnelle et professionnelle.

HOCINI ZOHRA

Dédicaces

Au nom d'Allah, celui sans qui rien ne peut se faire, le tout miséricordieux.

Je dédie ce mémoire :

Aux deux personnes qui me sont les plus chères au monde, mon cher père et ma chère mère, aux quels je tiens à exprimer ma profonde gratitude de leurs soutiens incessants, de leur patience incommensurable, de leurs sacrifices inestimables, et surtout leur tendresse. Aucune dédicace ne saurait exprimer Nos respects et Nos considérations. Que dieu prolonge vos jours dans la joie, la santé et la paix. Je vous aime très fort.

À mes très chers frères (Hassan, Massi, Rezak).

À mes très chères soeurs (Dahbia, Souad, Liza).

À mes grands parents.

À toute ma famille paternelle et maternelle.

À ma binôme «HOCINI ZOHRA» et toute sa famille.

À tous mes amis, tous ceux qui j'ai passé des meilleurs moments et Gardé de très bon souvenir.

SAMI NOUARA

Résumé

La notion d'augmentation de la capacité de fibre avec le multiplexage par répartition spatiale (SDM) est presque aussi ancienne communication par fibre elle-même, avec la fabrication de fibres contenant plusieurs coeurs, une attention particulière a été accordée à la création d'une plate-forme de mise en réseau complète au besoin pour utiliser des fibre multicoeur (MCF) et des modes dans un multimode fibre (MMF) comme moyen de définir des canaux séparés spatialement distincts.

Le multiplexage par répartition spatiale (SDM) utilise la multiplicité des canaux spatiaux pour augmenter la capacité de communication optique. Il est applicable pour la communication optique à la fois en espace libre et en ondes guidées.

Ce mémoire se concentre sur la technique SDM pour communication par fibre optique utilisant notamment des fibres à quelques modes ou des fibres multimodes sur le défi critique de la diaphonie de mode.

Abstract

The notion of increasing fibre capacity with space division multiplexing (SDM) is almost as old as fibre communication itself, with the manufacture of fibres containing several cores, Particular attention has been given to the creation of a complete networking platform as required to use multicour fiber (MCF) and modes in a fiber multimode (MMF) as a means of defining spatially separate channels.

Spatial Distribution Multiplexing (SDM) uses the multiplicity of space channels to increase optical communication capacity. It is applicable for optical communication in both free space and guided waves.

This memory focuses on the SDM technique for fiber-optic communication using, in particular, a few-mode fibers or multimode fibers on the critical challenge of fashion crosstalk.

TABLE DES MATIÈRES

Table des Matières	i
Liste des figures	iv
Liste des tableaux	vi
Introduction générale	1
1 Généralités sur la liaison optique	3
1.1 Introduction	3
1.2 Présentation d'une chaîne de transmission optique	3
1.3 Bloc d'émission	3
1.3.1 Les sources optiques	4
1.3.1.1 La diode électroluminescente (DEL)	4
1.3.1.2 La diode LASER (DL)	5
1.3.1.3 La différence entre la diode DEL et la diode DL	5
1.3.2 La modulation	6
1.3.2.1 La modulation directe	6
1.3.2.2 La modulation externe	6
1.4 Le support de transmission (La fibre optique)	7
1.4.1 Les différents Types des fibres optiques	8
1.4.1.1 Fibre optique monomode	8
1.4.1.2 Fibre optique multimode	8
1.4.2 Les effets linéaires et non linéaires	9
1.4.2.1 Propriétés optique linéaire	9
1.4.2.2 Effets non linéaires	11
1.5 Bloc de réception	13
1.5.1 Photo détecteur	13

1.5.1.1	Photodiode PIN	13
1.5.1.2	Photodiode avalanche (APD)	14
1.5.1.3	Comparaison entre les deux types des photodiodes	15
1.6	Le multiplexage dans la fibre optique	15
1.6.1	Le multiplexage Temporel (TDM)	15
1.6.2	Le multiplexage en longueur d’onde (WDM)	16
1.6.3	Accès multiple par répartition de code optique (OCDMA)	16
1.6.4	Le multiplexage mode spatial (SDM)	17
1.7	Conclusion	18
2	La technique SDM	19
2.1	Introduction	19
2.2	Le multiplexage de mode spatial (SDM : Space Division Multiplexing)	20
2.3	Diaphonie	21
2.4	Mise en oeuvre du multiplexage de mode spatial	23
2.5	Les différentes technologies de fibre pour le multiplexage de mode spatial	23
2.5.1	Le multiplexage de mode spatial par les fibres multi-coeurs	23
2.5.2	Le multiplexage de mode spatial par les fibres multimodes	24
2.5.3	Le multiplexage de mode spatial par les fibres multicoeurs-multimodes	25
2.6	Performance du multiplexage spatial	26
2.6.1	Performances des fibres MCF	26
2.6.2	Performances des fibres MDM	26
2.7	Conclusion	26
3	Simulation d’une liaison SDM	28
3.1	Introduction	28
3.2	Présentation du logiciel OptiSystème	28
3.2.1	L’interface de travail sur OptiSystème	28
3.2.2	La bibliothèque	29
3.3	Conception d’une liaison optique	29
3.3.1	Emetteur optique	30
3.3.2	Le canal de transmission	30
3.3.3	Récepteurs optiques	31
3.4	Principales caractéristiques du logiciel Optisystem	31
3.5	Critères de qualité d’une transmission	32
3.5.1	Diagramme de l’oeil	32
3.5.2	Le taux d’erreurs binaire (BER)	33
3.6	Simulation	34
3.6.1	Simulation de trois utilisateurs	35
3.6.2	Effet de variation de la distance	37

3.6.3 L'effet du variation de débit	40
3.7 Conclusion	41
Conclusion générale	43
Bibliographie	ix

LISTE DES FIGURES

1.1	Schéma synoptique d'une liaison optique.	4
1.2	(a)Spectre d'émission d'une DEL, (b) Représentation schématique d'une diode DEL.	5
1.3	(a)Spectre d'émission d'une DL, (b) la diode Laser.	5
1.4	Schéma montrant le principe de La modulation directe.	6
1.5	Schéma d'une modulation externe.	7
1.6	Schéma d'une fibre optique.	8
1.7	Fibre optique monomode et son trajet lumineux.	8
1.8	Fibre optique multimode à saut d'indice avec son trajet lumineux.	8
1.9	Fibre optique multimode à gradient d'indice avec son trajet lumineux.	9
1.10	L'atténuation spectrale d'une fibre en silice.	10
1.11	La dispersion chromatique.	10
1.12	Les deux sources principales de la dispersion chromatique.	10
1.13	Photodiode PIN.	14
1.14	Photodiode APD.	14
1.15	Multiplexage TDM.	16
1.16	Multiplexage WDM.	16
1.17	Technique d'accès multiple OCDMA.	17
1.18	Multiplexage de mode spatial.	17
2.1	Évolution de la capacité des réseaux de transmission au cours des deux dernières décennies.	19
2.2	Principe du multiplexage de mode spatial.	20
2.3	(a)Profil d'indice avec tranchée , (b) Schéma d'une fibre multicoeur avec profil d'indice avec tranchée.	22
2.4	Principe de transmission par fibre multi-coeurs et les différentes géométries de fibre multi-coeurs avec l'exemple de fibre avec 7, 12 et 19 coeurs.	24
2.5	Principe du multiplexage de mode spatial dans les fibres multimodes : exemple d'une transmission de trois modes.	25

3.1	L'interface de travail sur OptiSystème.	29
3.2	La bibliothèque de logiciel OptiSystème.	29
3.3	Conception d'une liaison optique.	30
3.4	Bibliothèque des émetteurs optiques.	30
3.5	Bibliothèque des fibres optique.	31
3.6	Bibliothèque des récepteurs optique.	31
3.7	Modification composant du paramètre.	32
3.8	Diagrammes de l'oeil d'un signal codé NRZ, et un autre codée RZ.	33
3.9	Diagramme de l'oeil.	33
3.10	La fibre multicoeur (MCF).	34
3.11	Le multiplexeur spatial.	34
3.12	Le montage de simulation d'une liaison SDM en utilisant les techniques MCF et MDM.	36
3.13	Les différents profils des modes pour chaque utilisateur.	37
3.14	BER en fonction de la distance.	38
3.15	Evaluation du diagramme de l'oeil pour les 3 utilisateurs (3 modes) en fonction la distance.	39
3.16	BER en fonction de débit.	40
3.17	Evaluation du diagramme de l'oeil pour les 3 utilisateurs (3 modes) en fonction du débit.	41

LISTE DES TABLEAUX

1.1	Comparaison des caractéristiques des photodiodes PIN et PDA [13].	15
-----	---	----

LISTE DES ABRÉVIATIONS

Acronyme	Signification (anglais)	Signification (français)
APD	Photodiode avalanche	Photodiode avalanche
BER	Binary Error Rate	Taux d'erreur binaire
CDL	Core dependent loss	Perte dépendante du noyau
CIL	Coupler insertion loss	Perte d'insertion du coupleur
DEL	Light emitting diode	Diode électroluminescente
DL	Laser diodes	Diodes laser
FWM	Four-Wave Mixing	Mélange à quatre ondes
FMF	Few-Mode Fiber	Fibre faiblement multimode
LP	Linearly Polarized	Linéairement Polarisé
MCF	Multi-Core Fiber	Fibre multicoeur
MDM	Mode Division Multiplexing	Multiplexage par division de mode
MFD	mode field diameter	Diamètre du champ modal
MMF	Fibre multimode	MultiMode Fiber
MIMO	Multiple Input Multiple Output	Multiple entrées multiple sorties
Mux	Multiplexer	Multiplexeur

MZM	Mach-Zehnder Modulator	Modulateur Mach-Zehnder
NRZ	No Return To Zero	Non-retour à zéro
OCDMA	Optical Code Division Multiple	Accès multiple par division d'optique
OTDMA	Optical Time Division Multiple	Accès multiple par division temporelle
PDM	Polarisation Division Multiplexing	Multiplexage de polarisation
PIN	Positive Intrinsic Negative	Positive Intrinsèque Négative
PRBS	Pseudo-Random Binary Sequence	Séquence binaire pseudo aléatoire
RZ	Return To Zero	Retour à zéro
SDM	Spatial Mode Multiplexing	Multiplexage de mode spatial
SMF	Single Mode Fiber	Fibre monomode
SPM	Self Phase Modulation	Auto-modulation de phase
SMUX	Spatial Multiplexer	Multiplexeur spatial
TDM	Time multiplexing	Multiplexage Temporel
WDM	Wavelength Division Multiplexing	Multiplexage de longueur d'onde
XPM	Cross Phase Modulation	Modulation de phase croisée

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Afin de pouvoir fournir des services intégrés de qualité, l'évolution des télécommunications optiques a permis aux réseaux de télécommunications d'atteindre un niveau de performances élevé et a ouvert les portes devant l'apparition de nouvelles disciplines, qui visent l'amélioration de l'existant et la création de nouveaux dispositifs pour la transmission et le traitement du signal optique.

Les infrastructures de télécommunication par fibre optique doivent néanmoins s'adapter à l'augmentation de la demande en termes de débit. Une première solution est d'installer des systèmes supplémentaires dont les technologies sont proches de celles des systèmes actuels. La maîtrise et l'optimisation des différents équipements permettent une diminution du coût de la nouvelle ligne installée comparée aux précédentes. Une solution alternative est le déploiement de systèmes à plus haut débit dans le but de minimiser le nombre d'équipements dans la ligne de transmission. Cette économie réduit potentiellement le coût total de la ligne de transmission. Néanmoins, le déploiement d'un système à plus haut débit nécessite un travail de recherche pour le développement d'innovations et de nouveaux équipements permettant de transmettre les données à un débit plus important dans une seule fibre optique.

Ce mémoire est organisé en trois(03) chapitres :

Dans le premier chapitre, nous allons étudier les liaisons par fibres optiques, tels que l'émetteur optique et le récepteur optique en spécifiant les différents types de composants et une étude détaillée sur les fibres optiques.

Dans le deuxième chapitre, nous allons voir le principe de multiplexage de mode spatial comme moyen de continuer à augmenter significativement le débit dans les fibres optiques et potentiellement diminuer le coût par bit. Ensuite nous allons montrer la contrainte la plus importante reliée au SDM qui est la diaphonie entre les modes. Puis nous allons présenter les différents moyens de mettre en oeuvre le multiplexage de mode spatial, Les différentes technologies de fibre pour le multiplexage de mode spatial, Les performance du multiplexage spatial et nous allons mettre en évidence la possibilité

d'améliorer ces performances mais aussi les limites de ces améliorations.

Dans le troisième chapitre, afin d'améliorer des modèles canal SDM et validation expérimentale nous allons concentrer sur les techniques MDM et MCF qui va être analysé à l'aide du logiciel Optisystem, tenu compte des modes de polarisation pour chaque utilisateurs ainsi que des solutions de multiplexage spatial.

Nous allons ainsi tester l'effet de variation de la distance et de débit par rapport au taux d'erreur binaire. Dans un second temps, des résultats vont permettre de déterminer les meilleures configurations et les conditions qui permettent au réseau de fonctionner avec une bonne qualité de transmission et moins de problèmes. Des résultats visuels du signal de transmission SDM peuvent être effectués pour tenir compte de l'interaction de la dispersion qui se traduira par une variation de BER. L'expérience permettra de tenir compte aussi de la non-blancheur spatiale du bruit et, éventuellement, des effets non-linéaires pour des niveaux de puissance élevés injectés dans la fibre.

Au cours de ce travail nous allons effectuer diverses études sur les systèmes de transmission optique afin d'étudier la possibilité de faire migrer leur débit par canal de MCF de manière optimale sans dégrader leurs performances, tout en garantissant une augmentation de capacité.

Enfin, nous concluons ce travail par une conclusion générale.

CHAPITRE 1

GÉNÉRALITÉS SUR LA LIAISON OPTIQUE

1.1 Introduction

En télécommunication, la fibre optique est utilisée pour la transmission de l'information, que ce soit des conversations téléphoniques, des images ou des données. En effet, elle est indispensable de nos jours, ceci grâce à sa grande bande passante ainsi que sa vitesse plus rapide [1].

Dans ce chapitre nous allons présenter une chaîne de transmission optique et détailler les différents blocs qui la composent. Nous allons décrire les différents types de sources optiques et les techniques de modulations. Ensuite, les classifications des fibres optiques ainsi que les effets linéaires et non linéaires. Par la suite, une présentation de bloc de la réception et enfin les différents techniques de multiplexage.

1.2 Présentation d'une chaîne de transmission optique

Comme tous les systèmes de communications, les liaisons optiques se basent sur trois blocs fondamentaux pour effectuer le transfert de l'information, qui sont comme suit [2] : (voir la Figure 1.1)

- **Bloc d'émission** : qui est composé de codage de l'information, source optique et modulation.
- **La chaîne de transmission** : fibre optique.
- **Bloc de réception** : qui est généralement photodiode et circuit de décision.

1.3 Bloc d'émission

L'objectif principale d'un émetteur optique est de convertir un signal électrique vers un signal optique pour l'adapter au canal.

Le bloc d'émission est constitué : sources optiques et modulation que nous allons définir dans les sous sections suivantes.

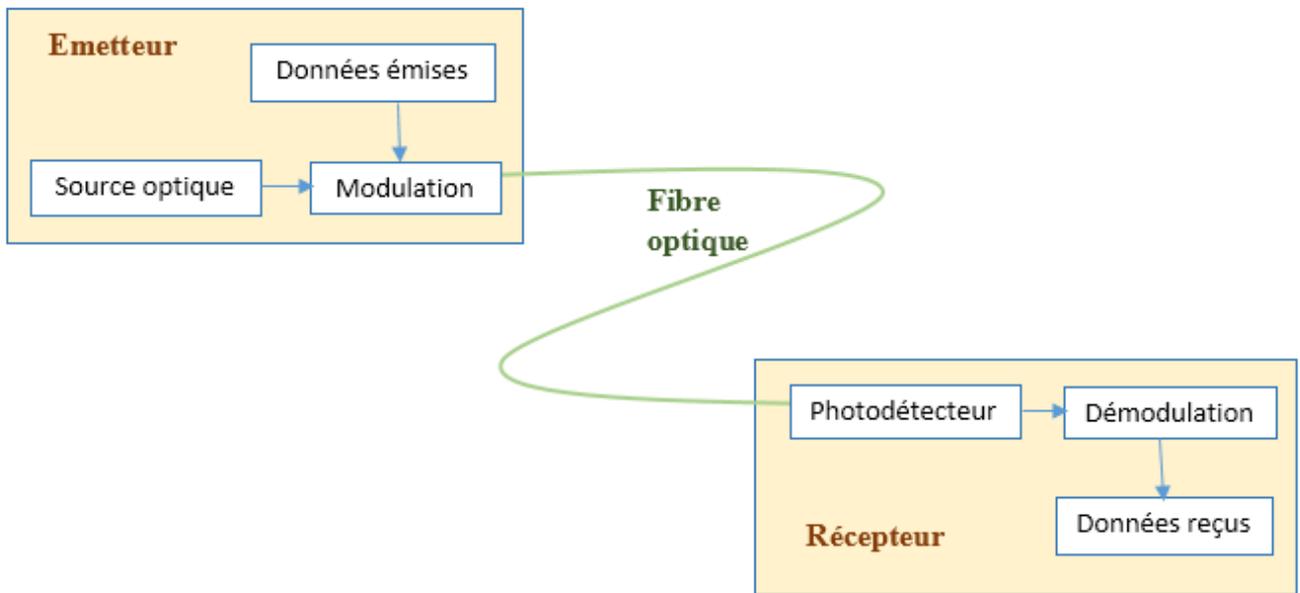


FIGURE 1.1 – Schéma synoptique d'une liaison optique.

1.3.1 Les sources optiques

En télécommunication optique, la nécessité d'utiliser des bandes passantes de plus en plus larges impose le choix des sources à spectres réduits telles que les diodes électroluminescentes (DEL) et les diodes laser (DL), ces deux sources sont réalisées à partir des jonctions PN polarisées en direct, le principe d'émission est dû à la recombinaison des paires électron-trou [3].

1.3.1.1 La diode électroluminescente (DEL)

Une diode électroluminescente (DEL) est un composant constitué de semi-conducteurs. Cette diode émet de la lumière quand elle polarisée en direct. La structure de base de la DEL est une jonction p-n, c'est-à-dire un empilement de deux couches semi-conductrices, la première de type p (trous majoritaires) et la seconde de type n (électrons majoritaires) [4].

C'est une source incohérente et polychromatique, elle présente un spectre d'émission assez large et un diagramme de rayonnement moins directif, elle est utilisée dans les systèmes de transmission qui ne nécessitent pas de très grandes bandes passantes. Elle a un spectre typique d'émission spontanée, continu et assez large d'où une forte sensibilité à la dispersion chromatique (Figures 1.2(a) et 1.2(b)) [5].

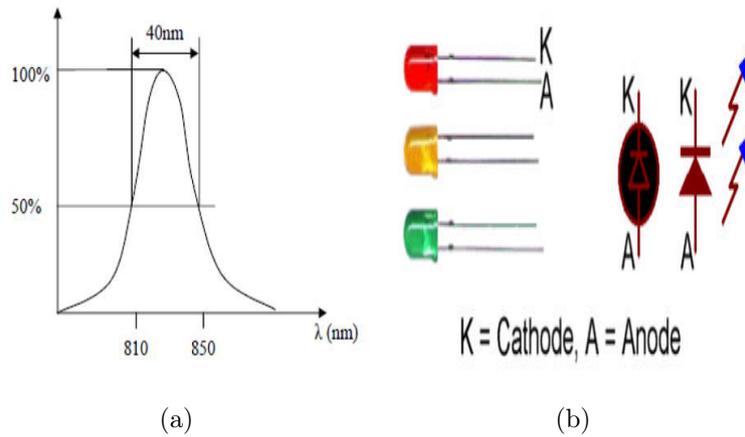


FIGURE 1.2 – (a) Spectre d'émission d'une DEL, (b) Représentation schématique d'une diode DEL.

1.3.1.2 La diode LASER (DL)

La diode laser est une source cohérente et monochromatique, elle est utilisée dans les systèmes de transmission à très longue distance, ce type de diode caractérisé par : une faible largeur spectrale et une bande passante importante. Le spectre est monomode longitudinal (Figures 1.3(a) et 1.3(b)) [5].

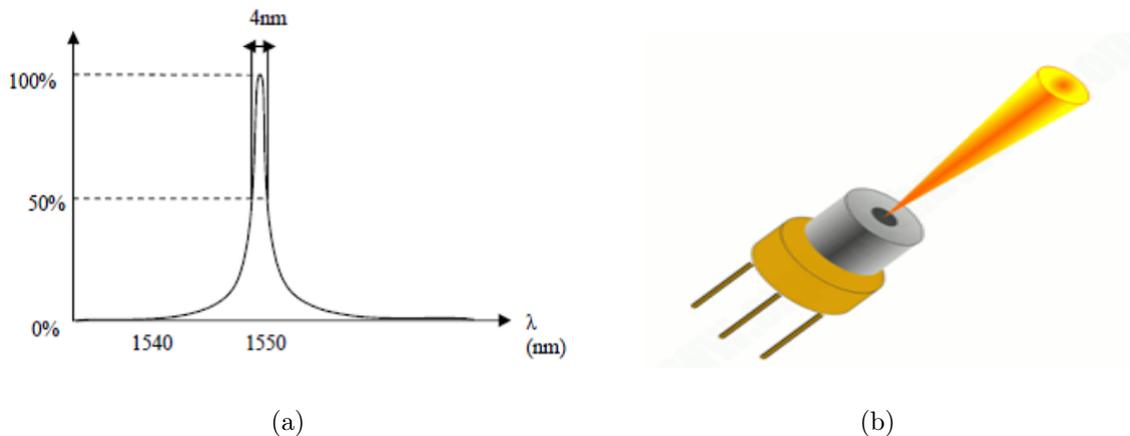


FIGURE 1.3 – (a) Spectre d'émission d'une DL, (b) la diode Laser.

1.3.1.3 La différence entre la diode DEL et la diode DL

Il y a quelques différences entre la diode DEL et la diode DL peuvent être montrée ci-dessous :

- La sortie de la LED laser est incohérente alors que d'un laser à diode est cohérent.
- La lumière d'une LED à une large largeur spectrale et une divergence de faisceau et donc la capacité de transport d'information d'un système est beaucoup moins.

- La lumière d'une diode laser DL a une cohérence spatiale et temporelle et est donc très monochromatique.
- La diode laser est hautement directionnel.
- Coupler la LED à la fibre est plus difficile et la quantité d'énergie qu'elle peut lancer dans la fibre est relativement faible.
- La LED est moins chère par rapport aux diodes laser.

1.3.2 La modulation

La modulation reste une opération indispensable pour la transmission des données. Les principales techniques de modulation utilisées sont la modulation directe et la modulation externe.

1.3.2.1 La modulation directe

La modulation directe représente la modulation la plus simple car elle consiste à moduler directement par le courant d'alimentation du laser sans l'aide d'un modulateur externe l'intensité de la lumière émise par ce laser (la modulation se fait dans le laser lui-même). Cette modulation désigne le type de modulation le moins coûteux grâce au nombre de dispositifs réduits (sans avoir le besoin d'utiliser un modulateur externe).

Elle est aussi le type le moins adapté pour les transmissions à haut débit et ceux à large spectre [6].

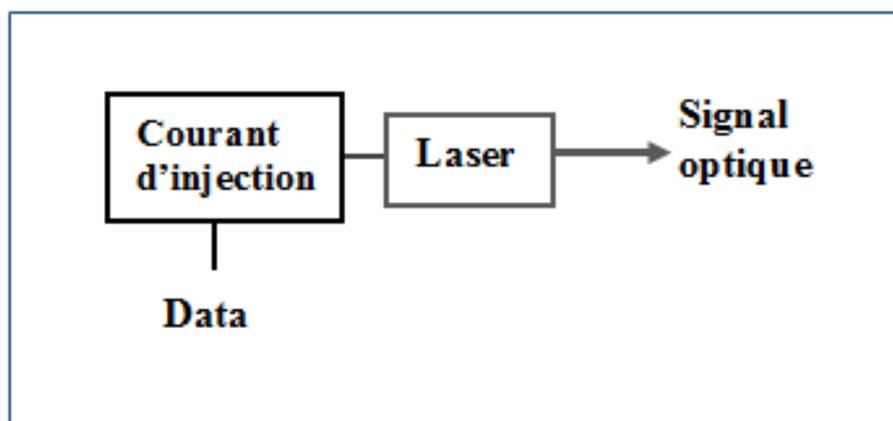


FIGURE 1.4 – Schéma montrant le principe de La modulation directe.

1.3.2.2 La modulation externe

La modulation la plus utilisée dans les télécommunications à haut débit sur de longues distances est la modulation externe, son principe consiste à utiliser un modulateur externe pour modifier l'un des paramètres de l'onde lumineuse et parvenir à moduler le signal lumineux car le courant injecté à

la diode restera constant. Ce type de modulation permet d'avoir une bande passante plus importante que celle de la modulation directe [7].

La technique la plus utilisée pour la modulation externe est celle de l'emploi d'un interféromètre de Mach-Zehnder qui a comme principe de changer et de modifier l'indice de réfraction de l'un ou des deux bras de l'interféromètre par l'application d'un champ électrique. Un déphasage entre les deux ondes qui se propagent dans les deux bras est causé par une différence de potentiel. Les deux ondes se recombinent par la suite et donnent lieu à des interférences (voir la Figure 1.5) [6].

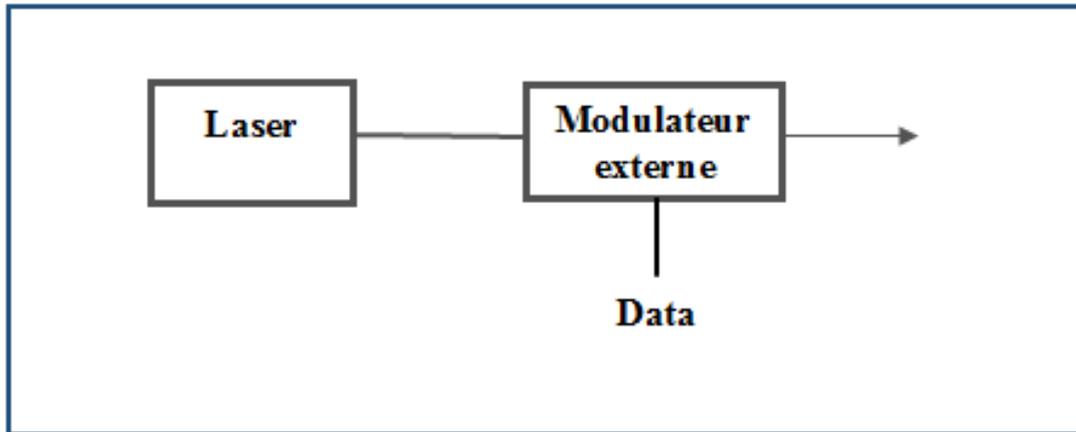


FIGURE 1.5 – Schéma d'une modulation externe.

1.4 Le support de transmission (La fibre optique)

La fibre optique est un support de transmission de la lumière (canal de transmission) dans les systèmes optiques permettant la transmission de données à haut débit grâce à des rayons optiques. Il est constitué des trois éléments principaux : le cœur, la gaine et le revêtement de protection. La fibre optique est généralement fabriquée de la silice, un matériau qui ressemble au verre. La silice est un composé de silicium (Si) et d'oxygène (O) dont la formule chimique est SiO_2 . Nous retrouvons ce composé dans la nature dans différents minéraux tels que le quartz. Le principe de fabrication d'une fibre optique repose sur l'étirage d'une préforme de verre. Grâce à des techniques complexes, on peut ainsi étirer un tube de verre d'un mètre de long sur 10 cm de diamètre jusqu'à en faire une fibre optique de 150 km de long [8].

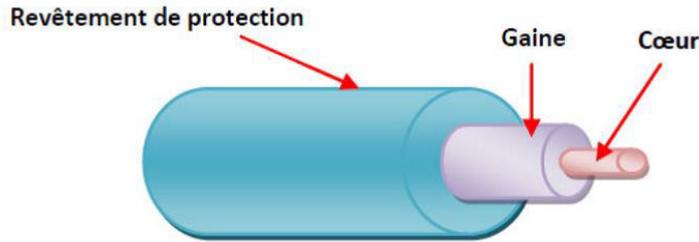


FIGURE 1.6 – Schéma d'une fibre optique.

1.4.1 Les différents Types des fibres optiques

Les fibres optiques peuvent être classées en deux catégories selon le diamètre de leur cœur et la longueur d'onde utilisée : les fibres monomodes et multimodes.

1.4.1.1 Fibre optique monomode

Dans cette fibre l'onde se propage alors suivant un seul chemin optique sans réflexion car le diamètre de cœur est très petit ($10\ \mu\text{m}$). On préfère utiliser des fibres Monomodes pour de plus longues distances et/ou de plus hauts débits.

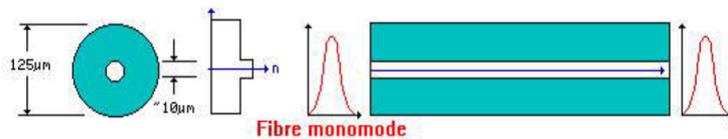


FIGURE 1.7 – Fibre optique monomode et son trajet lumineux.

1.4.1.2 Fibre optique multimode

Les fibres optiques multimode peuvent être classées en deux catégories : à saut d'indice et à gradient d'indice.

– **La fibre multi modes à saut d'indice :**

Elles sont constituées d'un cœur d'indice uniforme et d'une gaine avec une rupture d'indice, ou saut, à la frontière cœur-graine. La lumière est guidée par réflexion totale interne à l'interface cœur-graine, elle suit un chemin en zigzag.

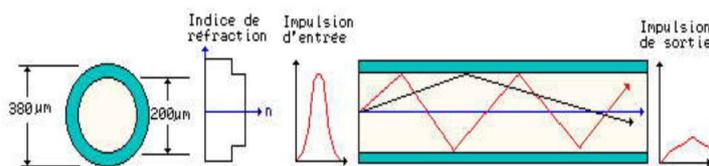


FIGURE 1.8 – Fibre optique multimode à saut d'indice avec son trajet lumineux.

– **La fibre multi modes à gradient d'indice :**

Dans ce type de fibres, l'indice du coeur diminue graduellement depuis l'axe centre de propagation jusqu'à la gaine.

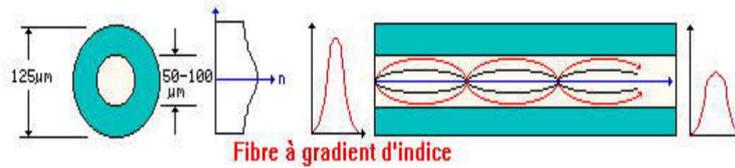


FIGURE 1.9 – Fibre optique multimode à gradient d'indice avec son trajet lumineux.

1.4.2 Les effets lineaires et non lineaires

1.4.2.1 Propriétés optique linéaire

Il y a beaucoup de propriétés linéaires qui caractérisent la fibre optique et il en sera présenté quelques-unes ci-dessous.

– **Atténuation dans la fibre optique :**

L'atténuation est une grandeur physique qui traduit l'affaiblissement du signal au cours de la propagation. L'atténuation dite linéaire se traduit par une décroissance exponentielle de la puissance en fonction de la longueur de la fibre :

$$P_e = P_r \exp(-\alpha L). \quad (1.1)$$

α le coefficient d'atténuation linéique (m^{-1}), L la longueur de la fibre (km), P_e et P_r sont respectivement les puissances d'émission et de réception.

En générale, l'atténuation dans les fibres est exprimée par unité de longueur (dB/km) :

$$A(\text{dB/km}) = \frac{A_{\text{tot}}(\text{dB})}{L(\text{km})}. \quad (1.2)$$

A_{tot} : Représente l'atténuation total de la fibre optique.

L'atténuation dépend de la longueur d'onde de la lumière porteuse (Figure 1.10), les meilleures fenêtres de transmission optique sont celles qui minimisent les phénomènes physiques à l'origine de l'atténuation.

L'atténuation minimale de 0,2 dB/km n'est pas très loin du minimum théorique pour la silice. La différence s'explique par le fait que l'on ne peut pas utiliser de la silice pure. On doit doper soit le coeur, soit la gaine et cela augmente les fluctuations de composition et donc les pertes par diffusion [9].

– **La dispersion :** Il existe deux types qui sont comme suit :

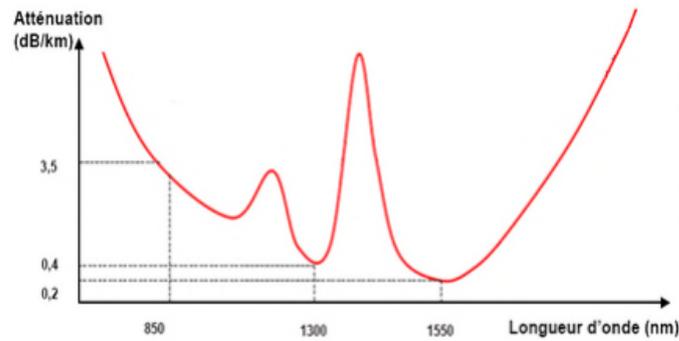


FIGURE 1.10 – L’atténuation spectrale d’une fibre en silice.

1. La dispersion chromatique :

La dispersion chromatique résulte de la différence de vitesse de groupe par rapport à la longueur d’onde. L’étalement temporel dû à la dispersion du signal s’exprime de la manière suivante :

$$\Delta t_g = D_g(\lambda) \cdot \Delta\lambda \cdot L \tag{1.3}$$

$\Delta\lambda$: largeur spectrale de la source, L : la longueur de la fibre optique, $D_g(\lambda)$: coefficient de dispersion du guide d’onde.

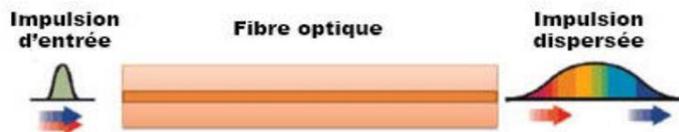


FIGURE 1.11 – La dispersion chromatique.

La dispersion chromatique résulte des deux sources : la dispersion de guide et la dispersion de matériau.

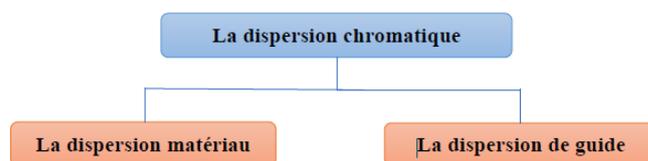


FIGURE 1.12 – Les deux sources principales de la dispersion chromatique.

2. La dispersion modale :

Elle existe dans les fibres multimodes à saut d’indice. En effet dans une fibre multimode, plusieurs chemins sont possibles pour la lumière, ces chemins ont des longueurs différentes

donc les temps de parcours sont différents aussi. La dispersion modale provient de la différence du temps de parcours de la lumière dans la fibre en fonction des chemins parcourus.

1.4.2.2 Effets non linéaires

Les effets non linéaires sont la variation de la vitesse de propagation liée à la longueur d'onde d'une part et à l'intensité d'autre part. Ils peuvent se traduire par :

- Une atténuation du signal en fonction de l'augmentation de puissance transmise.
- Une création de nouvelles longueurs d'onde.

Les principales causes des effets non linéaires sont :

1. **Effet de KERR** : Les effets non-linéaires subis par le signal optique au cours de sa propagation proviennent majoritairement de l'effet Kerr. Cet effet consiste en une variation de l'indice de réfraction du matériau en fonction de l'intensité du signal optique. L'indice de réfraction d'un milieu optique affecté par l'effet Kerr est déterminé de la manière suivante [10] :

$$n = n_0 + n_2|E|^2 = n_0 + n_2I \quad (1.4)$$

Où E : est le champ électrique, n_0 : est la contribution linéaire, n_2 : est le coefficient non linéaire de réfraction ou coefficient de Kerr qui dépend du matériau. Sa valeur typique dans la silice est d'environ $2,6 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ à 1550 nm pour une SMF (et elle varie peu en fonction du type de fibre), et I l'intensité du signal.

Le coefficient non linéaire défini par γ , rend compte de l'effet Kerr responsable des effets non linéaires.

$$\gamma = \frac{n_2 \cdot \omega}{C \cdot A_{\text{eff}}} \quad (1.5)$$

Avec ω : la pulsation du signal, C : la vitesse de la lumière dans le vide, A_{eff} la surface effective de la fibre.

Le paramètre γ donne une mesure de la sensibilité de la fibre aux effets non linéaires qui peuvent avoir lieu lors de la propagation d'une impulsion dans une fibre optique. Sa valeur dans les fibres monomodes standards est de $2\text{W}^{-1}\text{Km}^{-1}$ à 1500 nm, mais elle varie, de même que n_2 , avec le type de dopage et la surface effective.

Pour évaluer l'impact des effets non-linéaires sur une impulsion de puissance crête P_0 qui se propage dans une fibre possédant un coefficient non-linéaire γ , on utilise un paramètre appelé longueur non-linéaire L_{NL} :

$$L_{\text{NL}} = \frac{1}{\gamma P_0} \quad (1.6)$$

(a) L'auto-modulation de phase (SPM) :

L'auto-modulation de phase est le processus non linéaire d'ordre trois le plus fondamental et son traitement dans un formalisme en ondes planes est un processus temporel. La variation

temporelle de l'indice de réfraction crée de l'auto-modulation de phase. En effet, durant sa propagation, dans le cadre de l'approximation de l'enveloppe lentement variable et d'une réponse instantanée du milieu, l'impulsion acquiert une phase non Linéaire.

$$\Phi_{\text{NL}}(t) = \frac{2}{\lambda} n_2 L I(t) \quad (1.7)$$

Cette phase dépendante du temps modifie la largeur, la forme du spectre et la notion de fréquence instantanée :

$$\omega(t) = \omega_0 - \delta\omega(t) \quad (1.8)$$

$$\delta\omega(t) = -\frac{d}{dt}\Phi_{\text{NL}}(t) \quad (1.9)$$

(b) **La modulation de phase croisée (XPM) :**

La modulation de phase croisée (ou XPM pour Cross Phase Modulation) est basée sur le même principe physique que l'auto-modulation de phase, mais elle se produit en présence de plusieurs ondes dans la fibre optique. Ces ondes différentes peuvent être des ondes de longueurs d'onde différentes ou de même longueur d'onde mais de polarisations différentes. L'indice de réfraction vu par une onde est modulé, non seulement par sa propre intensité, mais aussi par l'intensité des autres ondes. Dans le cas d'un système à deux longueurs d'onde λ_1 et λ_2 , l'indice de réfraction vu par λ_1 est :

$$n = n_0 + n_2 [I(\lambda_1) + 2I(\lambda_2)] \quad (1.10)$$

Le terme dépendant de $I(\lambda_1)$ correspond à la SPM, et le terme dépendant de $I(\lambda_2)$, correspond à la XPM. La XPM est donc deux fois plus importante que la SPM dans ce cas. La XPM affecte notamment une liaison optique multiplexée en longueur d'onde (WDM).

(c) **Le mélange à quatre ondes (FWM) :**

C'est un mélange à quatre ondes résultant de la superposition nonlinéaire de trois ondes continues de fréquences porteuses ω_i , ω_j et ω_k entraînant l'émission d'une quatrième onde centrée sur la fréquence $\omega_l = \omega_i + \omega_j - \omega_k$. Les nouvelles fréquences générées par FWM sont appelées produits d'intermodulations. La polarisation non-linéaire conduisant à une génération de ce produit d'intermodulation par FWM s'écrit :

$$P_{\text{NL}}(\omega_i + \omega_j - \omega_k) = \frac{3}{4} \epsilon_0 \chi_3 E_i E_j E_k \quad (1.11)$$

On remarque que la condition d'accord de phase n'est pas nécessairement réalisée entre la polarisation nonlinéaire et les ondes qui l'introduisent. L'efficacité du mélange à quatre ondes est donc maximisée quand :

$$\Delta\beta = \beta_i + \beta_j - \beta_k - \beta_l = 0 \quad (1.12)$$

2. Effet de RAMAN :

Dans le cas de fibres passives, il est possible de montrer que la puissance signal critique (P_{cr}) dépend principalement du gain Raman g_r , de la longueur effective du milieu, L_{eff} et de l'aire effective du signal, A_{eff} [10].

$$P_{cr} = \alpha \frac{A_{eff}}{g_r L_{eff}} \quad (1.13)$$

Où L_{eff} dépend de l'absorption de la fibre, α et est donnée par :

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-\alpha z}}{\alpha} \quad (1.14)$$

Le coefficient de gain Raman (g_r) dépend de la composition de la matrice vitreuse.

1.5 Bloc de réception

Tout comme il existe plusieurs méthodes pour écrire l'information sur le signal lumineux, il existe différentes techniques pour la récupérer. Néanmoins, le photodétecteur est toujours nécessaire pour convertir le signal optique en électrique. Pour simplifier, nous pourrions le comparer à un compteur de photons et un générateur d'électrons. La première méthode de détection est appelée directe. Elle consiste en la conversion, grâce à une photodiode, des fluctuations de puissance optique porteuses de l'information en fluctuations de courant électrique. D'autres méthodes dites cohérentes (détecteurs hétérodyne et homodyne). La détection directe permet extraire le signal qui module en amplitude une onde, on peut le redresser, ou plus généralement le faire passer dans un dispositif non linéaire, tel qu'une diode. Un signal basse fréquence, le signal modulant et des harmoniques sont alors émis. Les harmoniques peuvent être éliminées par filtrage, dans la mesure où la fréquence de l'onde porteuse est très grande devant la fréquence maximale du spectre du signal modulant. Ce procédé est classiquement appelé détection directe.

1.5.1 Photo détecteur

Le photo détecteur peut être réalisé soit par une diode PIN, soit une photodiode à avalanche (PDA). Le principe de fonctionnement reste inchangé, il permet de traduire le signal optique envoyé par la fibre optique en signal électrique, qui sera traité par des dispositifs électroniques [11].

1.5.1.1 Photodiode PIN

Positive Intrinsic Negative Photodiode cette photodiode, polarisée en inverse, est réalisée à partir de trois couches de semi-conducteur. Deux couches fortement dopées P+ et N+ entre lesquels existe une couche de grande résistivité (presque intrinsèque) où il existe très peu de charges mobiles. Les photodiodes PIN sont les plus utilisées car elles sont peu coûteuses et simples à utiliser avec une performance satisfaisante (voir la Figure 1.13) [12].

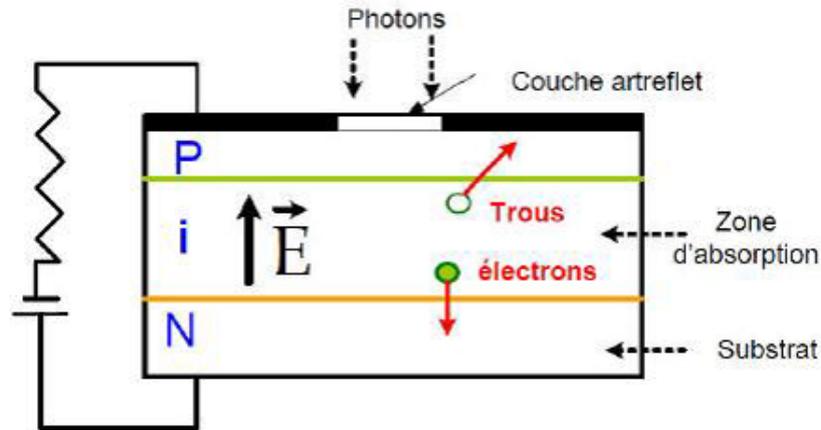


FIGURE 1.13 – Photodiode PIN.

1.5.1.2 Photodiode avalanche (APD)

Lorsque la puissance lumineuse reçue est très faible, les courants détectés sont peu élevés et se superposent au courant d'obscurité, conduisant à un mauvais rapport signal sur bruit. Pour augmenter ce dernier, il est nécessaire que le courant détecté soit plus important en utilisant d'autres types de photodiode, comme les photodiodes à gain interne de type avalanche. La photodiode d'avalanche est une diode PIN dans laquelle est réalisée une amplification de puissance, cela permet d'extraire un signal électrique fort même pour une puissance lumineuse affaiblie. Les photodiodes à avalanche sont aussi utilisées grâce à leurs performances, leur gain important et leur réponse rapide mais elles sont plus coûteuses, difficiles à utiliser et nécessitant une polarisation inverse très forte (voir la Figure 1.14) [12].

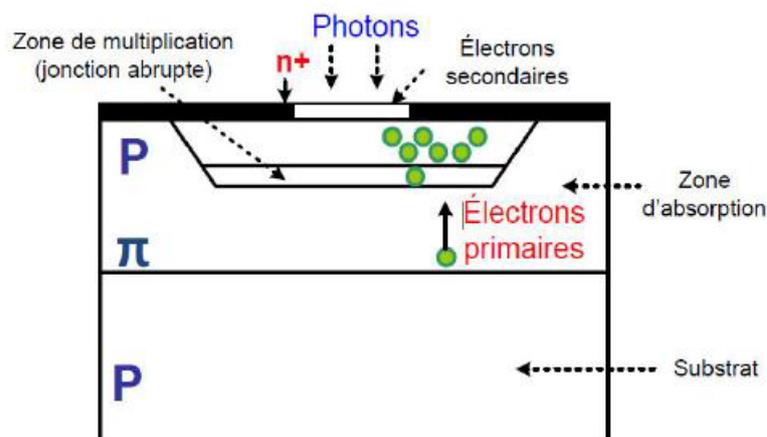


FIGURE 1.14 – Photodiode APD.

En transmissions optique les photo détecteurs doivent [12] :

- Offrir un bon couplage avec la fibre.
- Avoir une grande sensibilité à la longueur d'onde de fonctionnement.
- Avoir une bande passante convenable.

- Avoir une faible exigence du point de vue tension de source.
- Pas d'influence des conditions extérieures sur les caractéristiques.
- Avoir une grande fiabilité (bon rendement quantique) et un faible cout.
- Avoir un temps de réponse très court et un faible bruit additionnel.

1.5.1.3 Comparaison entre les deux types des photodiodes

Types de photodiode	Photodiodes	
	PIN	PDA
Caractéristiques		
Tension de commande(V)	Faible	Elevé
Fréquence de coupure (GHz)	> 60	Quelque
Rendement quantique (%)	Faible	Elevé
Bande passante (GHz)	Large	Faible
Longueur d'onde (nm)	1300 et 1550	1300 et 1550

TABLE 1.1 – Comparaison des caractéristiques des photodiodes PIN et PDA [13].

1.6 Le multiplexage dans la fibre optique

Les techniques de multiplexage ont été développées pour l'augmentation du nombre d'utilisateurs et de la quantité des données circulées dans les réseaux de communication. De nos jours, il existe une demande croissante des différentes techniques de multiplexage permettant à plusieurs utilisateurs de partager simultanément le même canal de transmission.

1.6.1 Le multiplexage Temporel (TDM)

Le TDM consiste à découper la bande passante de la fibre optique en unités de temps, que vont se partager les différentes communications. Cela permet donc à un émetteur de transmettre plusieurs canaux numériques élémentaires à faible débit sur un même support de communication à plus haut débit. Les informations importantes à retenir est répartition du temps d'utilisation entre les communications ; et chaque signal est commuté à tour de rôle à grande fréquence (voir la Figure 1.15) [1].

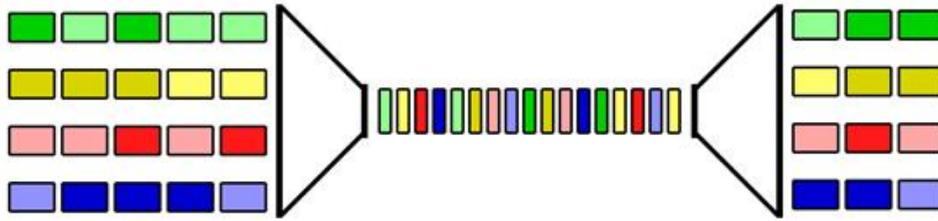


FIGURE 1.15 – Multiplexage TDM.

1.6.2 Le multiplexage en longueur d'onde (WDM)

Le WDM (Wavelength-Division-Multiplexing) consiste à mélanger plusieurs signaux optiques sur une même fibre optique afin de multiplier la bande passante de celle-ci. Les signaux sont portés par des longueurs d'ondes différentes, et espacés assez largement afin de ne pas interférer les uns avec les autres. Le multiplexeur (MUX) se charge d'injecter les différentes longueurs d'ondes dans la fibre et le démultiplexeur (DMUX) fait l'opération inverse (voir la Figure 1.16) [14].

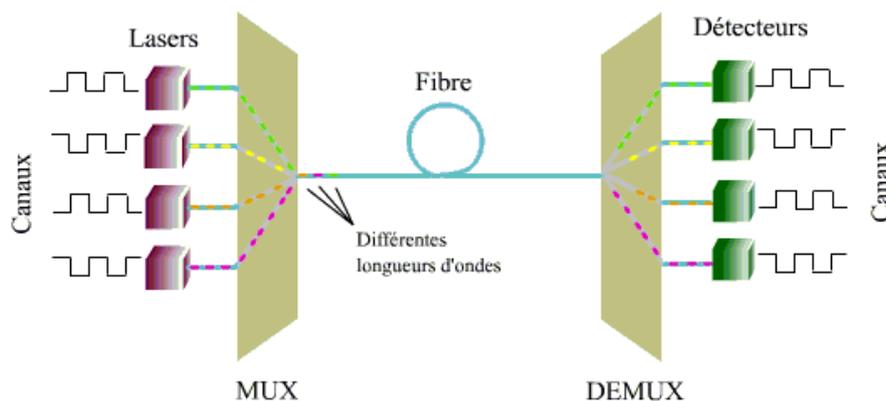


FIGURE 1.16 – Multiplexage WDM.

1.6.3 Accès multiple par répartition de code optique (OCDMA)

L'accès Multiple par Répartition de Codes optiques (AMRCO), appelé aussi Optical Code Division Multiple Access (OCDMA) est une technique d'étalement de spectre utilisée dans un premier temps par les militaires grâce à sa résistance aux interférences et pour les niveaux de sécurité qu'elle offre. Chaque utilisateur a un code d'étalement ou une signature qui lui est propre. Le nombre d'utilisateurs est lié au nombre de séquence d'étalement générées par une famille de donnée. L'OCDMA consiste donc à étaler ou à redistribuer le signal sur une très grande bande passante, jusqu'à le rendre "invisible" pour les autres utilisateurs qui partagent la même bande passante, à la réception, l'opération d'étalement exécutée lors de l'émission est répétée pour "dés étaler" le signal en bande de base tandis que les autres signaux transmis (interférant) sont perçus par le récepteur comme étant du bruit. Contrairement aux

techniques OTDMA et OFDMA, dans l'OCDMA « tout le monde parle en même temps et au même endroit mais chacun dans sa langue ». Elle permet à plusieurs utilisateurs d'un réseau de partager le même canal de transmission sans gestion de temps ni de fréquence. Cette technique apporte un accès multiple et un partage de ressource flexible, reconfigurable et sécurisé [15].

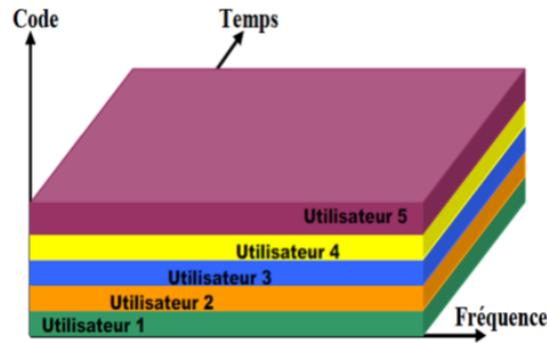


FIGURE 1.17 – Technique d'accès multiple OCDMA.

1.6.4 Le multiplexage mode spatial (SDM)

Le terme SDM est de nos jours utilisé pour désigner les techniques de multiplexage qui établissent des voies de données spatialement distinctes à travers la même fibre, bien qu'auparavant les mêmes terminologie a été précédemment appliquée pour décrire le cas de plusieurs systèmes de fibres parallèles : référence qui doit être battue sur une perspective de coût par bit si l'une des approches SDM actuellement sous enquête doivent être déployés à des fins commerciales [16].

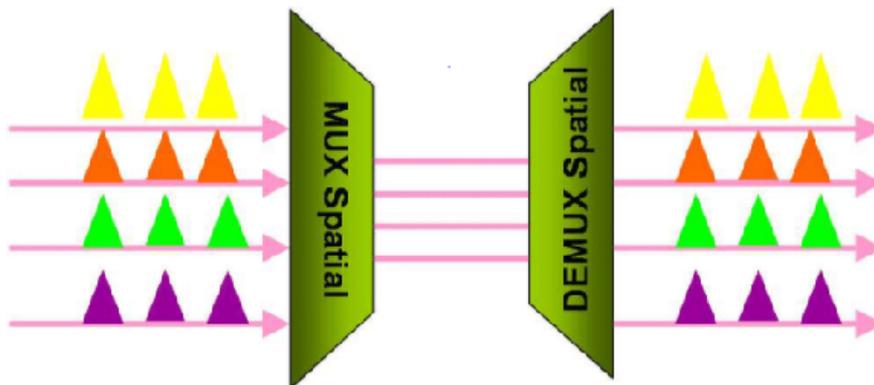


FIGURE 1.18 – Multiplexage de mode spatial.

Les systèmes de multiplexage par répartition spatiale (SDM) ont été proposés pour améliorer la capacité des liaisons de transmission à fibres optiques, soit par multiplexage central exploitant des fibres multicoeurs (MCF), ou avec un multiplexage en mode (MDM) [17].

1.7 Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre la description d'une liaison de fibre optique et de ses différents éléments tels que les composants de l'émetteur et du récepteur et le canal de transmission qui est la fibre optique avec leurs types.

Nous pouvons dire que la fibre optique est le meilleur support de transmission pour transporter les très hauts débits de données numériques et le besoin de celui-ci dans la communication moderne augmente jour après jour.

Dans le chapitre suivant, nous allons étudier la technique SDM (Space Division Multiplexing) dans les liaisons de télécommunications optiques, ainsi que ces différents types.

2.1 Introduction

Au cours des trois dernières décennies, les technologies liées aux communications optiques ont évolué à une vitesse fulgurante afin de répondre à une demande toujours grandissante du transfert de données via Internet [18]. Cette augmentation constante des taux de transfert d'information a orienté la recherche vers de nouvelles méthodes permettant d'augmenter la capacité de transmission des réseaux de fibre optique. Ces besoins ont mené à l'élaboration de différents types de multiplexage : dans le temps, en longueur d'onde, en polarisation.

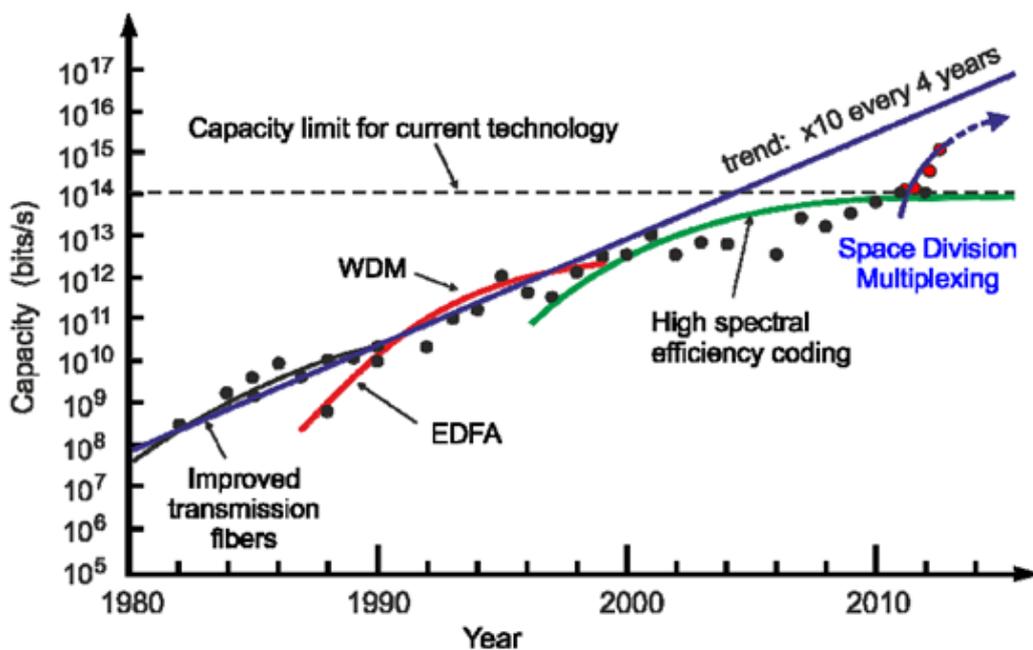


FIGURE 2.1 – Évolution de la capacité des réseaux de transmission au cours des deux dernières décennies.

Tel que démontré à la 2.1, toutes ces innovations ont permis jusqu'à ce jour de répondre à la demande croissante ; toutefois ces technologies atteindront bientôt leur plein potentiel et ne suffiront plus [19]. Il est donc impératif de mettre au point de nouvelles technologies qui permettront d'augmenter considérablement la capacité des réseaux de communications optiques. Une avenue possible est le multiplexage spatial (SDM : spatial division multiplexing), puisque l'espace est une dimension qui n'a pas été exploitée à ce jour pour les communications optiques. Le multiplexage spatial en soi n'est pas récent, certains articles sur le sujet datant du début des années 1980[20], mais des efforts importants pour mettre ces technologies en place ont récemment commencé à être déployés. Ce regain d'intérêt soudain est dû au récent développement de certaines technologies cruciales à l'élaboration et l'implémentation d'un réseau SDM. Notamment l'amélioration des procédés de fabrication de fibre optique permettant de fabriquer avec beaucoup de précision des structures complexes [21].

2.2 Le multiplexage de mode spatial (SDM : Space Division Multiplexing)

L'analyse de plusieurs scénarios de la continuation de l'augmentation du débit dans les fibres optiques dans les années à venir. Il montre que les techniques actuelles ne permettent plus une augmentation importante du débit dans une seule fibre optique à cause de l'existence d'une limite appelée limite de Shannon non linéaire. L'augmentation du débit dans la fibre passe donc par le développement de nouveaux moyens de transporter plus efficacement l'information dans la fibre optique. Une des solutions est d'exploiter la dimension spatiale par le multiplexage de mode spatial [20] dont le principe est représenté sur la Figure 2.2.

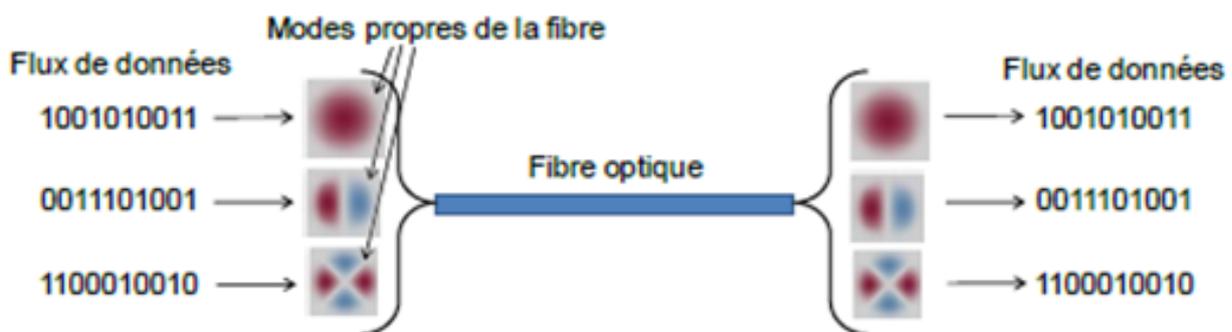


FIGURE 2.2 – Principe du multiplexage de mode spatial.

Le multiplexage de mode spatial consiste en la transmission de plusieurs séries de données indépendantes codées dans les différents modes spatiaux de la fibre optique, un mode spatial étant une solution de l'équation de propagation. De façon similaire au multiplexage en longueur d'onde, le débit total transmis dans la fibre est ainsi la somme du débit de tous les canaux de données [22]. En parallèle s'est aussi développé les transmissions dans les fibres multi-coeurs [23] où l'architecture des fibres est différente mais où le principe de la transmission reste très similaire. La principale difficulté de mise en oeuvre du multiplexage de mode spatial concerne le couplage entre les différents modes spatiaux impliquant une attention particulière pour l'extraction de l'information contenu dans chacun des modes après la transmission. Deux stratégies se sont ainsi révélées : la première, dite approche de modes couplés, extrait l'information contenue dans les modes spatiaux uniquement à l'aide d'un traitement numérique complexe [24] alors que la seconde appelée approche de modes faiblement couplés utilise une méthode hybride avec un système optique avec peu de couplages entre modes spatiaux suivi d'un traitement numérique plus simple que le précédent [25].

Le phénomène de diaphonie dégrade la qualité de la transmission des données, limitant ainsi le débit sur chacun des modes spatiaux et la distance de transmission. Pour estimer l'influence de ce phénomène, la description du principe de transmission dans les fibres optiques est donnée dans la troisième partie. L'approximation désignant la diaphonie similaire à un bruit blanc gaussien additif permet ensuite de quantifier la dégradation de la qualité de transmission des données en fonction du taux de diaphonie [20].

2.3 Diaphonie

Lorsque plusieurs canaux indépendants sont placés à proximité, que ce soit les coeurs d'une MCF ou les modes d'une MMF, il en résulte un transfert d'énergie entre ceux-ci. Ce phénomène s'appelle la diaphonie et est probablement la contrainte la plus importante liée au SDM. Elle amène une détérioration du signal et est une source de bruit pour les canaux voisins. Plusieurs études ont été menées sur la modélisation de la diaphonie, ses effets et les différents paramètres qui l'influencent [26].

La diaphonie peut être décrite à l'aide de la théorie des modes couplés. Suivant cette théorie, l'interaction entre deux canaux est caractérisée par un coefficient de couplage C_{ab} où a et b sont les indices utilisés pour identifier les deux canaux en question. Dans le cas d'une fibre multicoeur, théoriquement, chaque coeur est affecté par tous les autres présents dans la fibre. Cependant $C_{ab}=0$ pour deux coeurs non adjacents. Donc à toutes fins pratiques, seuls les coeurs voisins subissent un couplage significatif. Par exemple, pour une fibre ayant une géométrie hexagonale (voir Figure 2.3(b)) les coeurs extérieurs possèdent trois voisins immédiats alors que le coeur central en possède six, le rendant ainsi plus vulnérable à la diaphonie. Une étude a démontré qu'un niveau de diaphonie de moins de -25 dB pour chaque coeur est requis afin d'obtenir une qualité de signal satisfaisante à la réception [27]. En limitant le chevauchement du mode d'un coeur avec les coeurs voisins il est possible de contrer les effets néfastes causés par la diaphonie. La façon la plus évidente est de placer les coeurs suffisamment loin les uns des autres de façon à réduire l'interférence entre les coeurs à un niveau

tolérable. Une autre méthode, compatible avec la précédente, consiste à utiliser des coeurs possédant des profils d'indice avec tranchée [28] réduisant ainsi le diamètre du champ modal (MFD : mode field diameter) du signal. Les effets non-linéaires sont ici néfastes car ils introduisent des distorsions sur le signal [29]. Il est donc important d'optimiser les paramètres d'une fibre pour obtenir les performances requises. En utilisant la technique des profils d'indice avec tranchée et une distance entre chaque coeur d'environ $40 \mu\text{m}$, il est possible d'obtenir des niveaux de diaphonie aussi bas que -90 dB/km [30] rendant ainsi possible la transmission sur des milliers de kilomètres.

D'autres recherches ont démontré via des simulations que de légères variations dans les caractéristiques des coeurs (diamètre, indice de réfraction) d'une MCF réduisent la puissance transférée entre ceux-ci [31].

Une autre alternative avec les MCF consiste à négliger la diaphonie jusqu'à un certain niveau et d'utiliser des techniques de traitement de signal MIMO [32] à la réception du signal afin de supprimer l'interférence causée par la diaphonie. Bien que cette technique soit attrayante en raison de son efficacité à gérer la diaphonie, le traitement de signal MIMO implique l'utilisation de composants électroniques additionnels à la réception pour traiter le signal, ce qui augmente considérablement la complexité, la consommation d'énergie et les coûts d'un tel système. Par exemple le nombre de filtres égalisateurs nécessaires est quadratiquement proportionnel au nombre de signaux à traiter. Donc plus le nombre de coeurs que contient une MCF est grand, plus importants seront les désavantages mentionnés ci-dessus.

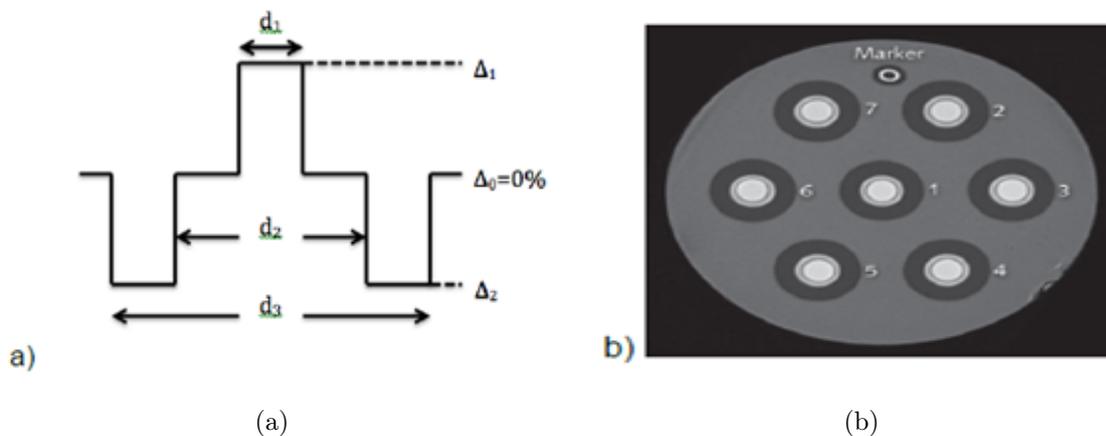


FIGURE 2.3 – (a) Profil d'indice avec tranchée , (b) Schéma d'une fibre multicoeur avec profile d'indice avec tranchée.

Pour les fibres multimodes, la diaphonie provient de l'échange d'énergie entre les différents modes se propageant dans le coeur. En théorie les modes de transmission d'une fibre sont orthogonaux et sont donc complètement indépendants les uns des autres. Mais en pratique, puisque les modes ne sont jamais parfaitement multiplexés de façon indépendante, il en résulte une certaine diaphonie. Pour séparer et filtrer les signaux à la sortie, le traitement de signal MIMO est généralement employé [26]. Encore une fois, l'utilisation du traitement MIMO signifie que des composants électroniques additionnels sont

nécessaires à la réception du signal. Mais puisque les différents modes partagent le même coeur, il n'existe pas de solution évidente pour limiter la diaphonie comme dans le cas des fibres multicoeurs et il est difficile de remédier à ce problème autrement que par le traitement de signal. Certaines recherches examinent une certaine famille de mode nommée modes de moment cinétique orbital [33].

2.4 Mise en oeuvre du multiplexage de mode spatial

Les différentes façons de réaliser une transmission utilisant le multiplexage de mode spatial sont présentées. Quelle que soit la méthode choisie, les éléments nécessaires à la transmission jouent un rôle semblable. En revanche, les contraintes sur leurs performances dans le but d'obtenir une transmission correcte des données seront différentes selon la stratégie choisie.

Le premier choix est la méthode d'extraction des données portées par les modes après la transmission dans la fibre optique. Cette extraction fait généralement intervenir un traitement numérique semblable à celui utilisé pour le démultiplexage polarisation. Néanmoins, l'architecture du récepteur peut se présenter sous plusieurs formes différentes décrites dans une première section. La technologie de fibre utilisée pour transmettre les modes spatiaux peut aussi être de nature différente [20].

2.5 Les différentes technologies de fibre pour le multiplexage de mode spatial

Sous le même terme de multiplexage de mode spatial, plusieurs types de technologies sont possibles pour sa mise en oeuvre. Actuellement, les trois principales catégories sont la transmission multi-coeurs, la transmission multimode et la combinaison de ces deux techniques c'est-à-dire la transmission multimode dans une fibre multi-coeurs [20].

2.5.1 Le multiplexage de mode spatial par les fibres multi-coeurs

Le principe de transmission par fibre multi-coeurs (MCF pour Multi Core Fiber en anglais) est représenté sur la Figure. Une fibre multi-coeurs possède plusieurs coeurs monomodes dans une même gaine. Un système spécifique appelé multiplexeur permet l'injection la lumière provenant de plusieurs fibres monomodes dans les différents coeurs de la fibre multi-coeurs. Après propagation dans la fibre multi-coeurs, le signal contenu dans chacun des coeurs est récupéré dans des fibres monomodes grâce à un montage similaire au multiplexeur mais utilisé en sens inverse. De nombreuses démonstrations de transmission dans les fibres possédant trois ou sept coeurs ont été réalisées [20] puis le nombre de coeurs a été augmenté à 12 [34] ou 19 [35] pour obtenir des fibres multi-coeurs avec un débit plus important. Actuellement le nombre maximum de coeurs pour la propagation multi-coeurs est de 31 [36]. Plusieurs types de géométrie de répartition des coeurs dans la gaine ont été expérimentés comme représenté sur la Figure 2.4. Les deux approches de modes couplés et faiblement couplés [20] sont possibles avec cette technologie. Dans [37], les deux approches sont même utilisées simultanément avec la conception d'une

fibre à neuf coeurs constitués de trois groupes de trois coeurs avec de faibles transferts d'énergie entre les trois groupes mais avec une diaphonie importante entre les trois coeurs de chaque groupe.

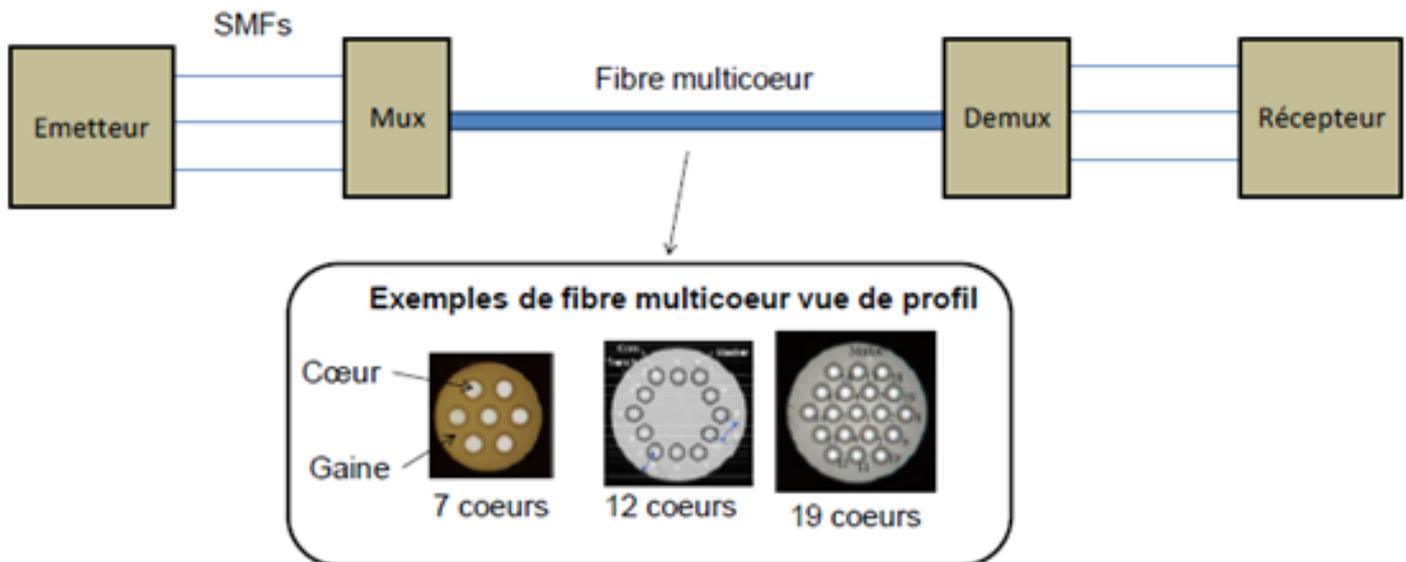


FIGURE 2.4 – Principe de transmission par fibre multi-coeurs et les différentes géométries de fibre multi-coeurs avec l'exemple de fibre avec 7, 12 et 19 coeurs.

Les transmissions longues par fibre multi-coeurs nécessitent un amplificateur susceptible d'amplifier simultanément le signal contenu dans tous les coeurs [20]. Pour amplifier le signal des fibres multi-coeurs, la conception d'amplificateur à fibre dopée erbium a été démontrée par l'utilisation de fibres à double coeurs où la pompe à 980 nm se propage dans un coeur plus large que les coeurs à 1550 nm [38]. Chaque coeur de la fibre est dopé avec des ions erbium afin d'amplifier le signal de façon identique aux amplificateurs à fibre dopée erbium classiques (voir partie 3.1). Des propagations allant au-delà de 6000 km sans erreur ont ainsi été réalisées en laboratoire [20]. Malgré ces bons résultats, les fibres multi-coeurs sont des fibres difficiles à fabriquer et les soudures demandent une attention particulière car les coeurs doivent être soigneusement alignés [39]. Le gain apporté par le multiplexage de mode spatial dans les fibres multi-coeurs reste donc à être démontré en comparaison à la solution où plusieurs fibres monomodes sont déployées les unes à côté des autres.

2.5.2 Le multiplexage de mode spatial par les fibres multimodes

Pour le multiplexage de mode spatial dans les fibres multimodes, différentes informations sont codées dans chaque mode LP. Le principe de ce type de transmission est représenté sur la Figure 2.5. Les modes sont convertis dans les modes LP et combinés ensemble par un multiplexeur de mode spatial. Une première catégorie de multiplexeurs est plus particulièrement adaptée pour une transmission mettant en oeuvre des modes fortement couplés. La grandeur critique à minimiser dans ce cas est la perte induite

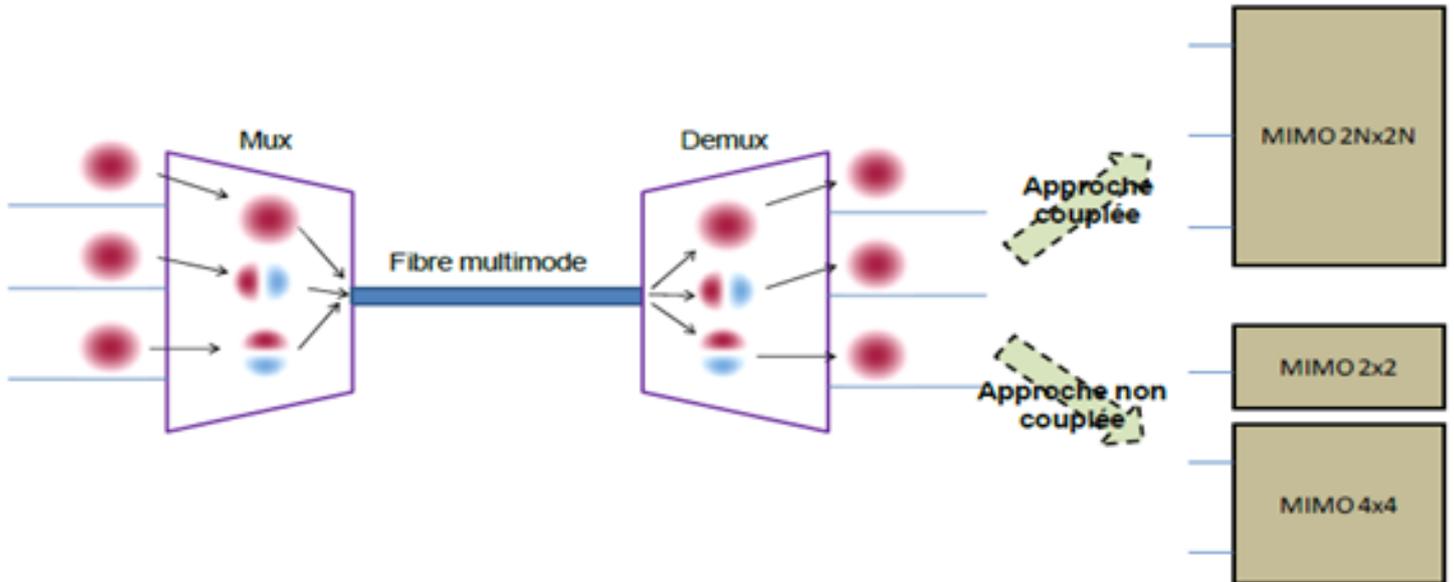


FIGURE 2.5 – Principe du multiplexage de mode spatial dans les fibres multimodes : exemple d'une transmission de trois modes.

par le multiplexeur alors que la diaphonie entre mode n'est pas un paramètre primordial puisqu'elle sera compensée par traitement de signal numérique. Un des premiers exemples utilisés est le multiplexeur basé sur la technologie multi-spots [20]. Mais cette technologie a été abandonnée car elle fait intervenir un montage en espace libre et encombrant et elle induit des pertes relativement importantes, autour de 3,6 dB pour le multiplexeur 3 modes [40].

2.5.3 Le multiplexage de mode spatial par les fibres multicoeurs-multimodes

Les deux types de SDM présentés dans les parties 2.5.1 et 2.5.2 peuvent être combinés ensemble afin d'obtenir des fibres ayant des capacités maximales [41]. Il s'agit de fibre multi-coeurs dont chaque coeur est susceptible de propager plusieurs modes spatiaux à la longueur d'onde des émetteurs. Des systèmes complexes sont nécessaires pour exciter correctement les modes spatiaux dans tous les coeurs. Cependant, avec cette technique, le nombre de canaux spatiaux multiplexés peuvent dépasser la centaine et le débit de la fibre optique peut ainsi dépasser le pétabit/s. La distance de transmission reste cependant limitée à une dizaine de kilomètres [18].

2.6 Performance du multiplexage spatial

2.6.1 Performances des fibres MCF

En augmentant le nombre de coeurs que contient une fibre on augmente de façon proportionnelle sa capacité de transmission. Puisque les MCF avec un diamètre supérieur à 200 μm sont plus susceptibles aux défaillances mécaniques (fissure, fracture, etc.)[42], le nombre de coeurs que peut contenir une MCF est limité. La plupart des MCF fabriquées à ce jour sont dotées de 7 coeurs disposés de façon hexagonale (voir Fig. 2b). Des vitesses de transmission au-delà de plusieurs Tb/s ont été réalisées en combinant le SDM, le WDM, le PDM et en utilisant des formats de modulation avancés [26]. Le record de transmission à ce jour dans une fibre à 7 coeurs est de 112-Tb/s avec une efficacité spectrale de 14 b/s/Hz sur une distance de 76.8 km [43].

Plus récemment, des fibres à 12 coeurs et même 19 coeurs ont été fabriquées [26]. Dans le cas de la fibre à 19 coeurs la diaphonie restreint la portée de transmission à seulement 10.1 km limitant donc son utilité malgré sa haute capacité de 305 Tb/s [44]. Avec une fibre à 12 coeurs disposés de manière circulaire, afin de limiter la diaphonie, 1.01-Pb/s de transmission a été réalisé avec une haute efficacité spectrale de 91.4 b/s/Hz [45]. Ces derniers résultats sont sans doute les meilleurs obtenus avec une MCF et démontrent comment de telles fibres peuvent aider à supporter la demande croissante de transfert de données.

2.6.2 Performances des fibres MDM

Similairement aux fibres multicoeurs, la capacité de transmission des fibres multimodes est directement proportionnelle au nombre de modes guidés. Le principal obstacle des fibres multimodes est la difficulté de multiplexer efficacement les différents modes dans la fibre. Les différentes techniques de multiplexage sont déjà présentées dans le chapitre précédent. En utilisant ces techniques, à ce jour seulement quelques modes ont pu être couplés indépendamment dans une même fibre. L'avantage des fibres multimodes par rapport aux fibres multicoeurs est la possibilité d'utiliser jusqu'à des dizaines de modes dans une même fibre. Mais pour cela des techniques efficaces de multiplexage/démultiplexage ainsi qu'une amélioration du traitement de signal MIMO seront nécessaires [26].

On constate qu'à ce jour les résultats obtenus avec les MCF sont supérieurs tant au niveau des vitesses de transmission que de l'efficacité spectrale pour une même distance de propagation [26].

2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés sur la technique SDM qui est la base de notre travail. En premier lieu, nous avons donné le principe du multiplexage de mode spatial, puis le phénomène de la diaphonie, les différentes technologies de fibre pour le multiplexage spatial et les classes de multiplexage spatial. Nous avons terminé par les performances des fibres multimode et multicoeur.

Ce chapitre a pour but d'apporter toutes les informations nécessaires à la compréhension de chapitre

suivant qui va représenter la partie simulation d'une liaison SDM et exploiter les technique MDM et MCF.

CHAPITRE 3

SIMULATION D'UNE LIAISON SDM

3.1 Introduction

Les systèmes de multiplexage spatial ont été proposés pour améliorer la capacité des liaisons de transmission en fibre optique, soit par l'exposition des fibres multicoeurs (MCF), ou avec multiplexage par répartition en mode (MDM).

Notre objectif dans ce chapitre est de simuler une liaison SDM en utilisant les techniques MDM et MCF.

La simulation a été mise en oeuvre à l'aide du logiciel Optisystem qui nous a permis de faire une étude en termes du taux d'erreur binaire(BER)et le diagramme de l'oeil .les résultats de cette analyse sont obtenus tout en variant la longueur de la fibre et le débit .

3.2 Présentation du logiciel OptiSystème

OptiSystem est un logiciel de conception, de tests et d'optimisation de n'importe quel type de liaison optique.

3.2.1 L'interface de travail sur OptiSystème

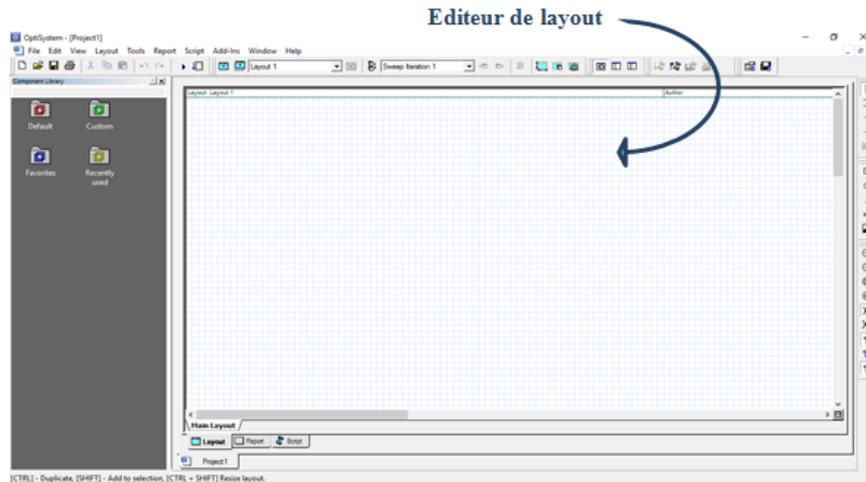


FIGURE 3.1 – L'interface de travail sur OptiSystème.

3.2.2 La bibliothèque

Elle contient tout type de modèles qui permettent de réaliser les différents schémas Blocs : entrées, régénérateurs, codeurs, modulateur, filtres, ...

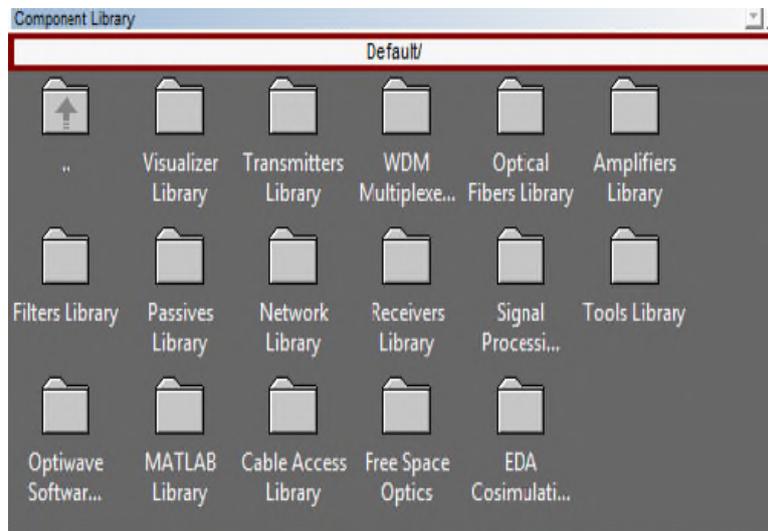


FIGURE 3.2 – La bibliothèque de logiciel OptiSystème.

3.3 Conception d'une liaison optique

Un système de communication optique est constitué d'un :

- Emetteur.
- Canal de communication.
- Récepteur.



FIGURE 3.3 – Conception d'une liaison optique.

3.3.1 Émetteur optique

Les tâches de l'émetteur optique sont :

- Convertir le signal électrique en un signal optique.
- Injecter le signal optique résultant dans la fibre optique.

Un émetteur optique est modélisé par :

- Source optique.
- Générateur d'impulsions électriques.
- Modulateur optique.

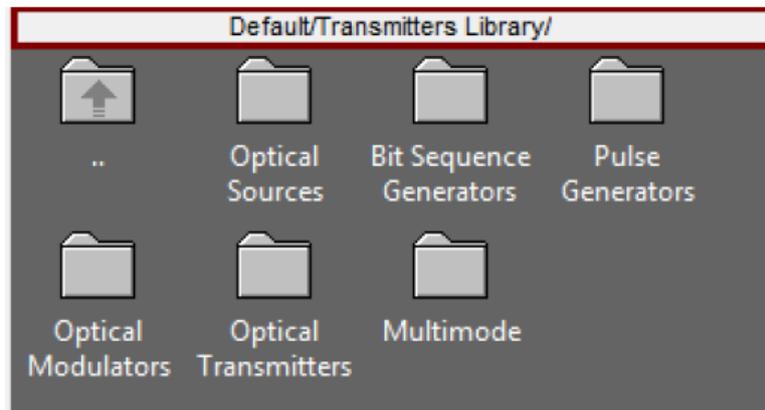


FIGURE 3.4 – Bibliothèque des émetteurs optiques.

3.3.2 Le canal de transmission

Le canal de transmission optique utilisé est la fibre optique, son rôle est de transporter un signal optique de l'émetteur au récepteur. Dans une chaîne de transmission, plusieurs pertes peuvent être rencontrées telles que l'atténuation et la dispersion, en agissant sur la longueur de la fibre, nous pouvons constater la dégradation du signal au niveau du récepteur ainsi que l'élargissement des impulsions à l'intérieur de la fibre.

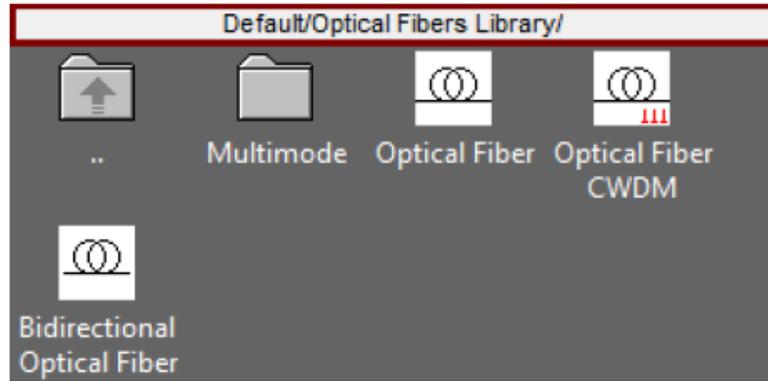


FIGURE 3.5 – Bibliothèque des fibres optique.

3.3.3 Récepteurs optiques

Un récepteur optique convertit le signal optique reçu à sortie de la fibre en un signal électrique.

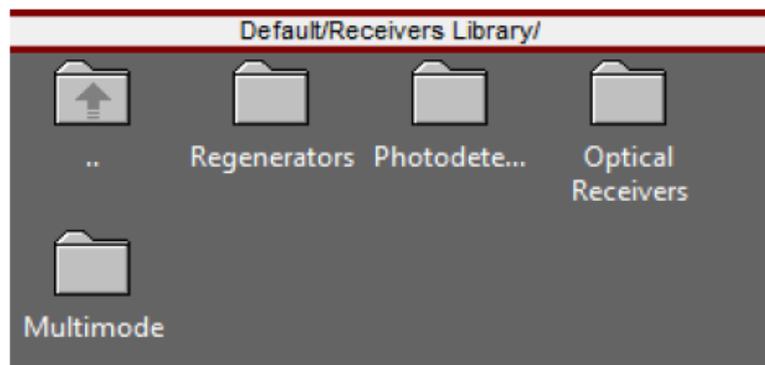


FIGURE 3.6 – Bibliothèque des récepteurs optique.

3.4 Principales caractéristiques du logiciel Optisystem

Les principales caractéristiques du logiciel sont :

- Les composants virtuels de la Bibliothèque sont capables de reproduire le même comportement et le même effet spécifique en fonction de la précision sélectionnée et leur efficacité reproduite par les composants réels.
- La bibliothèque des composants permet d'entrer les paramètres qui peuvent être mesurés à partir de périphériques réels, il s'intègre aux équipements de test et de mesurer des différents fournisseurs (Figure 3.4).
- Les outils de visualisation avancée produisent le SAOS Spectral, le signal sonore, les diagrammes de l'oeil, l'état de la polarisation, les constellations schémas et beaucoup plus.
- Il est possible de joindre un nombre arbitraire des visualiser sur le moniteur au même port.

- L'état de l'art et le calcul de flux de données.

Le calcul planificateur contrôle la simulation en déterminent l'ordre d'exécution des modules composant selon les données sélectionnées.

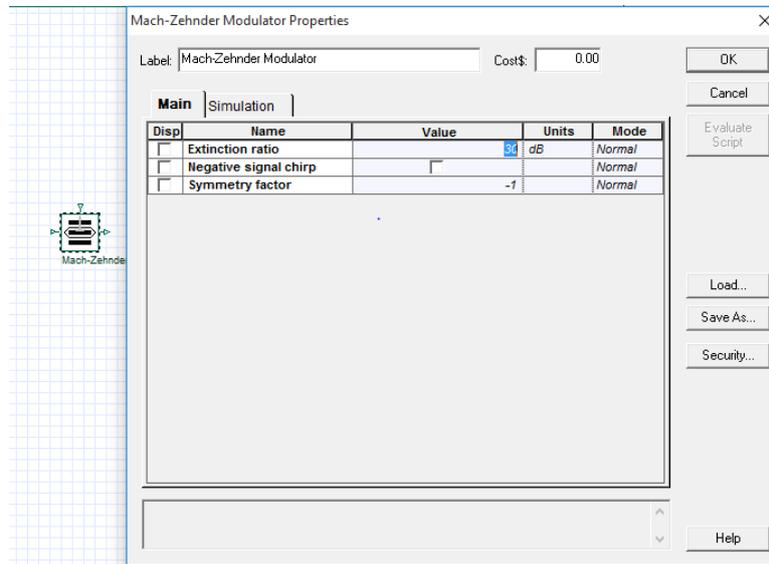


FIGURE 3.7 – Modification composant du paramètre.

3.5 Critères de qualité d'une transmission

Au vu de toutes les dégradations que peut subir le signal lors de son transport via la fibre optique, il s'est avéré nécessaire d'établir des critères pour juger de la qualité d'une transmission. En pratique, ces critères sont évalués après détection du signal et sont surtout utilisés en laboratoire pour tester les performances de nouvelles transmissions : impact de nouveaux formats, insertion de fonctions de traitement du signal.

3.5.1 Diagramme de l'oeil

La façon la plus « visuelle » de juger la qualité d'un signal est d'observer le diagramme de l'oeil qui représente la superposition synchrone de tous les symboles binaires de la séquence transmise. Ce diagramme dépend du type de codage utilisé comme le montre la figure 3.8.

Cette courbe permet de visualiser, dans le domaine électrique après détection à l'aide d'une photodiode, la qualité du signal en termes :

- Interférences entre symboles qui sont la conséquence principale de l'élargissement temporel des impulsions du signal due à la dispersion chromatique ou à la SPM.
- Bruit d'amplitude qui résulte de l'accumulation du bruit d'émission spontanée amplifiée sur le signal tout au long de son parcours dans la liaison.

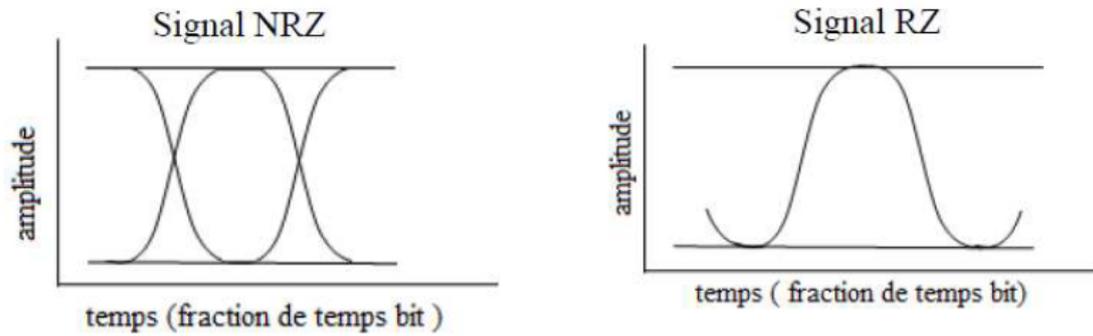


FIGURE 3.8 – Diagrammes de l’œil d’un signal codé NRZ, et un autre codé RZ.

- Gigue temporelle provoqué par la dispersion de mode de polarisation mais également du couplage entre les impulsions et le bruit d’émission spontanée amplifiée.

3.5.2 Le taux d’erreurs binaire (BER)

Si le diagramme de l’œil est la façon la plus visuelle de qualité d’un signal numérique, alors le critère qui quantifie le mieux cette qualité de transmission est le Taux d’erreurs binaire (TEB, ou BER pour Bit Error Rate) qui représente la probabilité d’une prise de décision erronée sur un élément binaire. Il se définit comme suit :

$$TEB = BER = \frac{\text{Nombre d'erreurs détectés}}{\text{Nombre de bits transmis}} \tag{3.1}$$

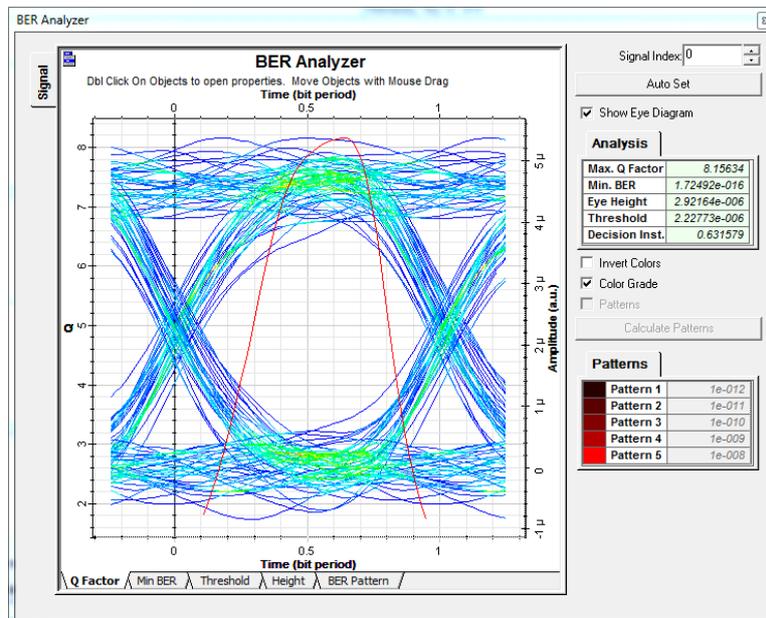


FIGURE 3.9 – Diagramme de l’œil.

3.6 Simulation

MCF pour SDM a été proposé en 1979. En 2000, le manque de capacité est devenu un gros problème. Par conséquent, le MCF était venu pour attirer beaucoup d'attention, et il est prévu comme un bon candidat depuis la multiplicité de coeur et la multiplicité de mode peuvent être combinées dans MCF [46].

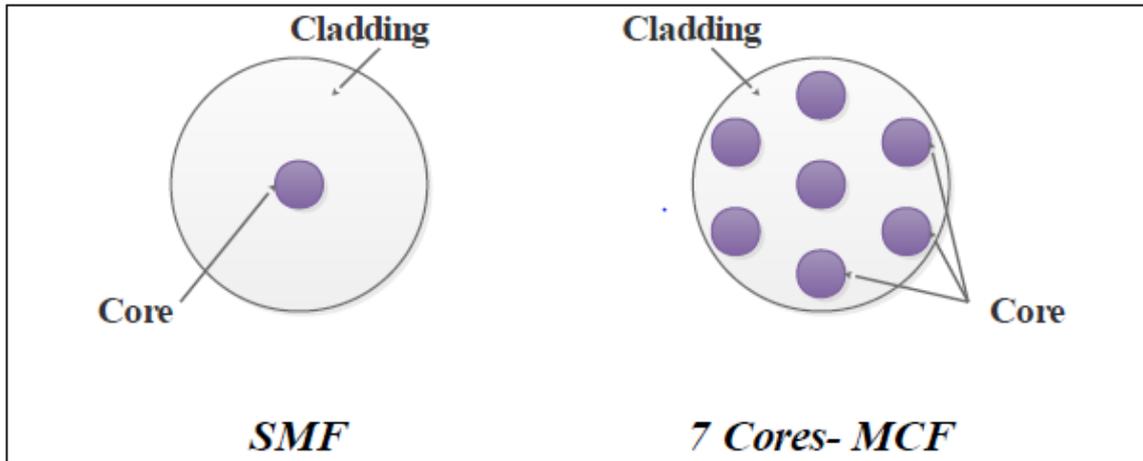


FIGURE 3.10 – La fibre multicoeur (MCF).

La Figure 3.11 Affiche un diagramme schématique d'un multiplexeur spatial (SMUX), dont la fonctionnalité de base est de convertir la puissance optique d'un faisceau de SMF en modes ou en noyaux séparés d'une fibre MCF [47].

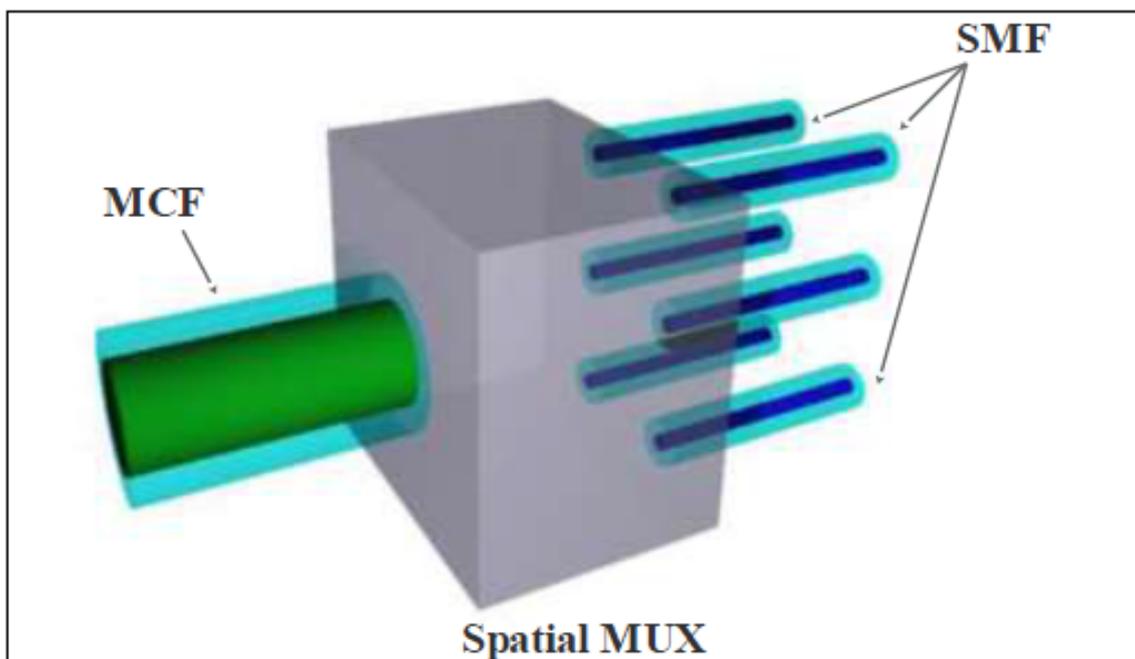


FIGURE 3.11 – Le multiplexeur spatial.

Pour vérifier les performances des SMUX, la perte dépendante de base (CDL) et la perte d'insertion de coupleur (CIL) peuvent être exploités. CDL est la différence de perte entre les meilleurs et les pires noyaux. CIL est la perte moyenne d'insertion pour tous les canaux spatiaux.

Afin de simplifier le modèle, les matrices sont utilisées pour représenter le SMUX, comme indiqué ci-dessous dans l'équation 3.2 :

$$\begin{pmatrix} M_1 \\ M_2 \\ \vdots \\ M_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma_{1,1} & \gamma_{1,2} & \cdots & \gamma_{1,N} \\ \gamma_{2,1} & \ddots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma_{N,1} & \vdots & \cdots & \gamma_{N,N} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_N \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

Où «M» représente un tableau des champs de canaux spatiaux, «I» est le champ de lancement de chaque SMF, et N est le nombre de canaux spatiaux (nombre de coeurs) dans la fibre MCF. Le transfert la matrice du SMUX comprend l'intégrale de chevauchement au niveau de la facette de fibre MCF. Il peut être calculé comme indiqué ci-dessous :

$$\gamma_{i,j} = \frac{\int E^*_{\text{Launch},i} \cdot H_{\text{spatial},j} \cdot dA}{\sqrt{\int E^*_{\text{Launch},i} \cdot H_{\text{spatial},j} \cdot dA} \sqrt{\int E^*_{\text{mode},i} \cdot H_{\text{spatial},j} \cdot dA}} \leq 1 \quad (3.3)$$

Où $E^*_{\text{Launch},i}$ (la notation * indique le conjugué complexe.), i et $H_{\text{spatial},j}$ sont les champs électrique transversal du i ème champ de lancement à la facette de la fibre MCF et du champ magnétique transversal champ du j ème canal spatial, respectivement. A est l'aire de la section transversale de la fibre.

Le MCF avec des coeurs découplés est exploité, l'équation 3.2 peut être réécrite comme un matrice diagonale Γ . CDL et CIL peuvent être calculés immédiatement avec les entrées diagonales de Γ , lequel :

$$\begin{pmatrix} M_1 \\ M_2 \\ \vdots \\ M_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma_{1,1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_{2,2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \gamma_{N,N} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_N \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

$$\text{CDL} = \max(\gamma_{n,n}^2) / \min(\gamma_{n,n}^2) \quad (3.5)$$

$$\text{CIL} = \sum (\gamma_{n,n}^2) / N \quad (3.6)$$

3.6.1 Simulation de trois utilisateurs

On a établie une simulation de trois 03 utilisateurs en utilisant la technique MDM pour identifier les utilisateurs, et dans la fibre on a utilisé une fibre multicoeur.

Les informations pour chaque utilisateur est généré par une séquence de bits pseudo aléatoire (PRBS), le générateur d'impulsions NRZ est utilisé pour représenter les informations sous forme électrique. Ensuite, chaque signal optique traverse le generateur de mode permettant d'ajouter un profil

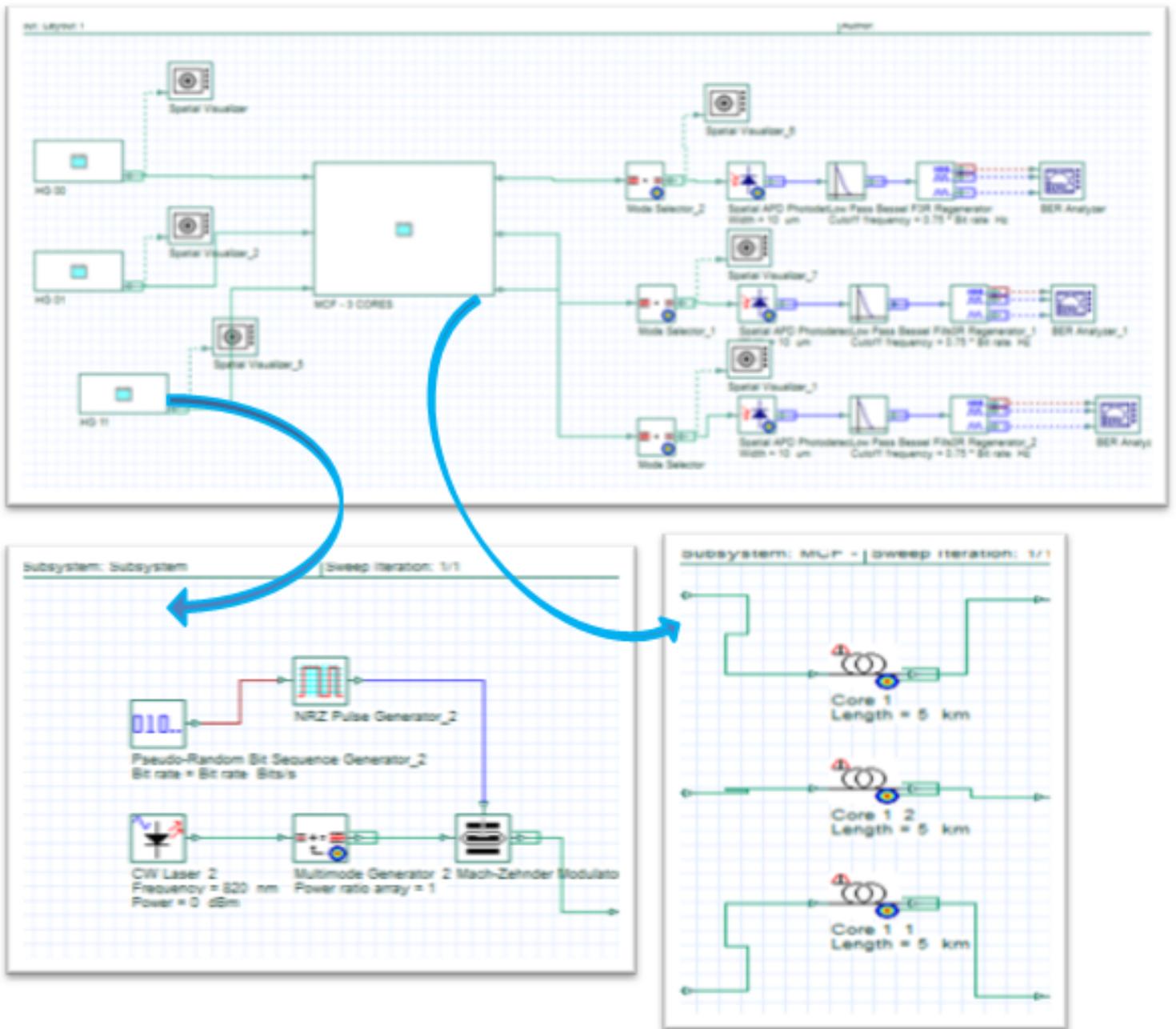


FIGURE 3.12 – Le montage de simulation d'une liaison SDM en utilisant les techniques MCF et MDM.

de mode et qui sera modulé en utilisant Mach-Zehnder Modulator, afin de convertir le signal électrique en signal optique. Dans le dernier, c'est inversé. À l'aide du visualiseur spatial, nous pouvons voir le profil de chaque mode présenté sur le port d'entrée du visualiseur.

Le signal de trois utilisateurs traversera un MCF. Les signaux de ces utilisateurs sont propagés via un MCF. Où, chaque utilisateur a son propre mode.

Pour récupérer le signal de données de tous les utilisateurs, le multimode selector est un dispositif qui permet de sélectionner le mode émis par l'émetteur. Le signal sera directement détecté par la photo diode comme modulation d'intensité normale. Le signal résultant du photo détecteur est filtré par le filtre passe-bas. Ce filtre est exploité pour rejeter les interférences et le bruit. Pour vérifier les performances de cette méthode, un analyseur BER est utilisé (Figure 3.12).

Les différents modes utilisés pour chaque utilisateur sont représentés dans la figure ci-dessous :

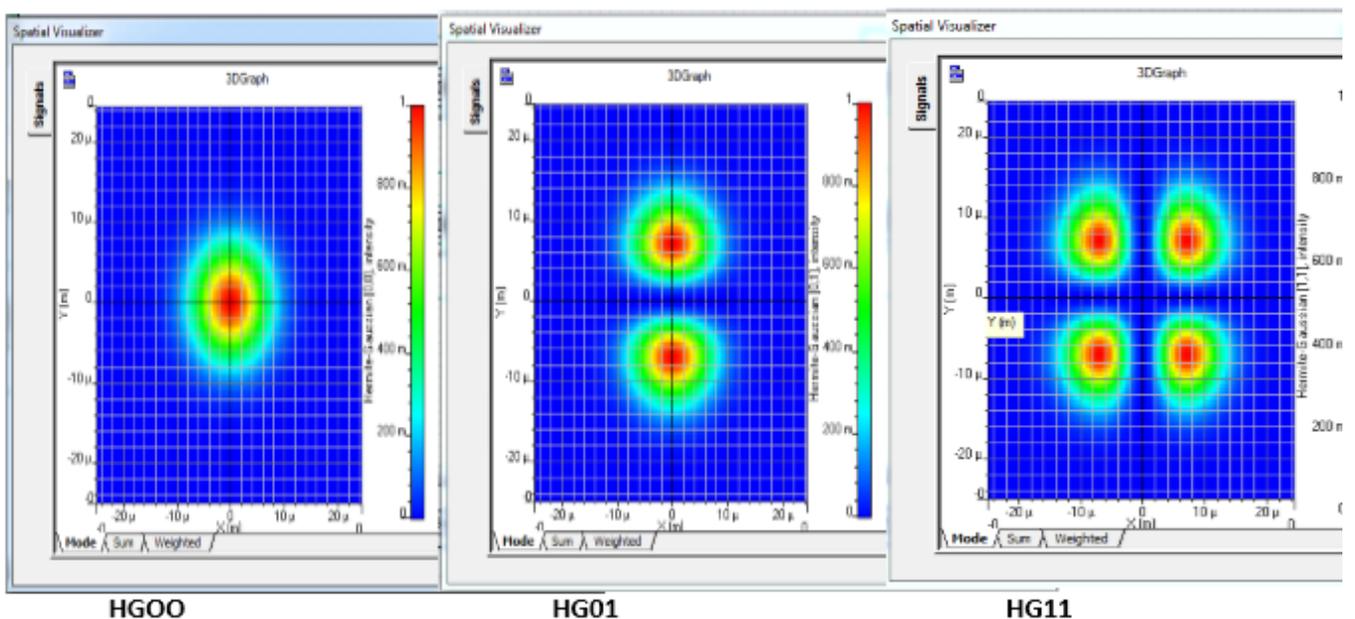


FIGURE 3.13 – Les différents profils des modes pour chaque utilisateur.

3.6.2 Effet de variation de la distance

Dans cette partie, on a étudié l'effet de variation de la longueur de la fibre. Où, pour chaque utilisateur, son propre mode et un débit de données de 10Gbit / s.

La figure 3.14 représente le BER par rapport à la longueur de la fibre. Les courbes obtenues montrent clairement l'augmentation de la valeur BER avec l'augmentation de la longueur de la fibre, causée par les effets linéaires et non linéaires (atténuation, dispersion, ...), qui perturbent les performances de transmission. Nous voyons bien que pour le 1er utilisateur (1er mode HG00) aucune mesure du BER dans des distances inférieures à 3km (BER=0), ce qui signifie l'absence des interférences et l'information émis est identique à celle envoyé.

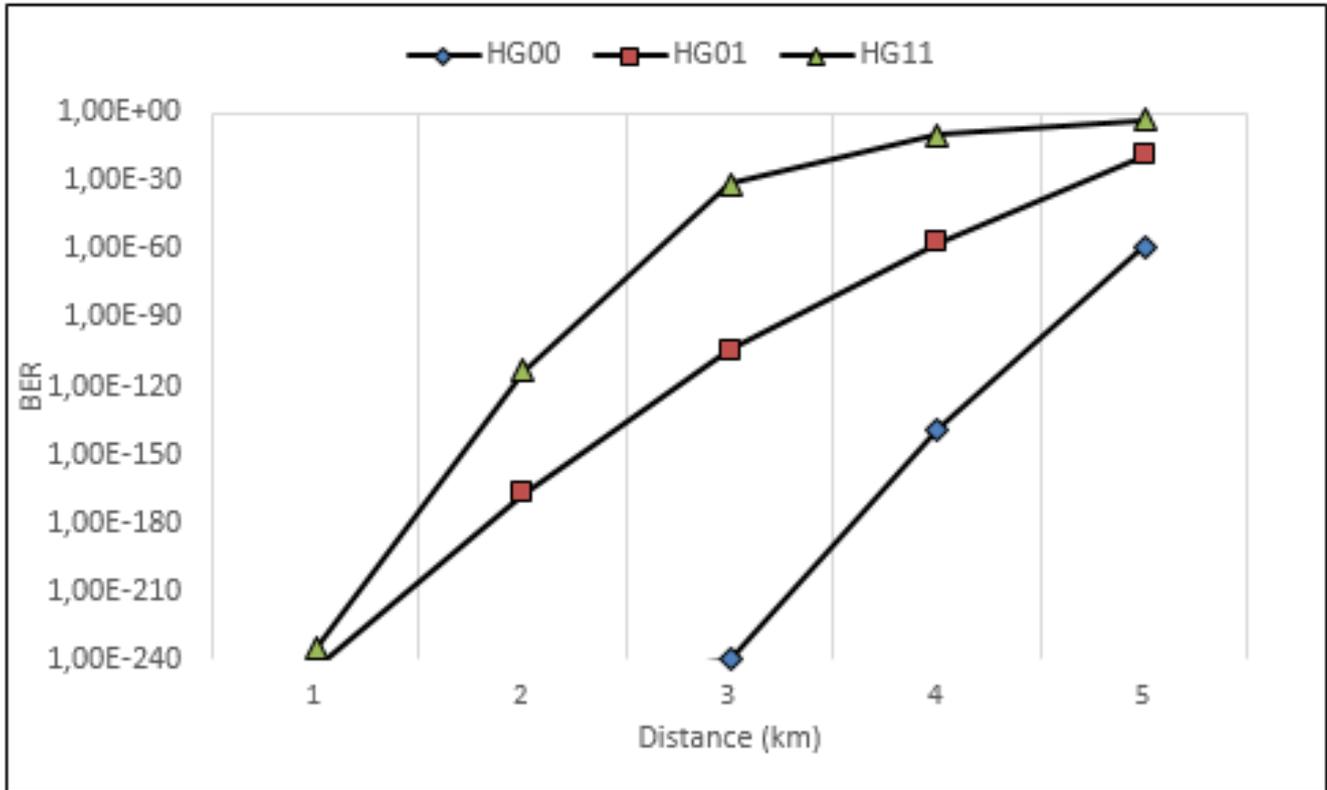
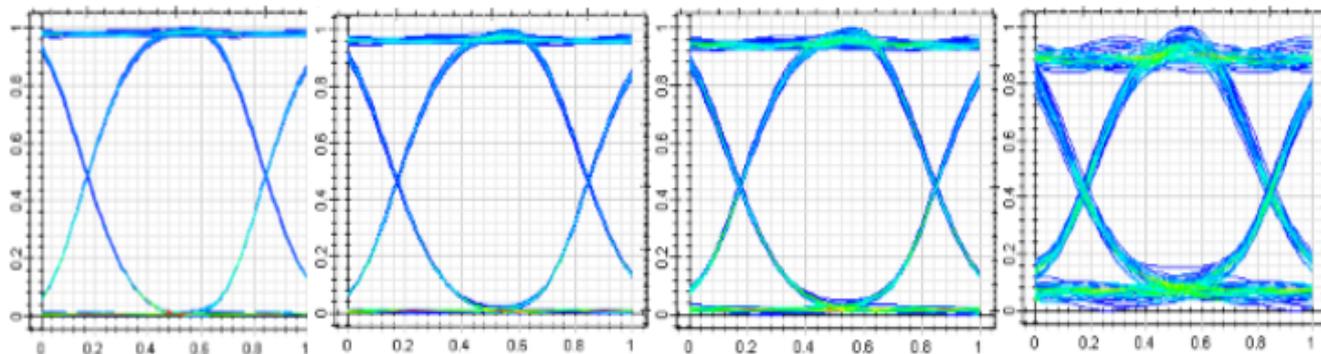
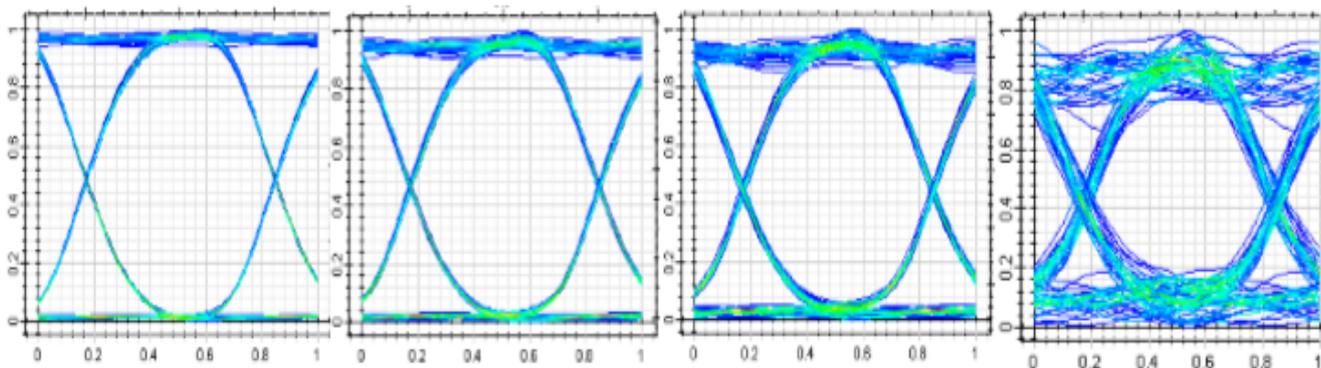


FIGURE 3.14 – BER en fonction de la distance.

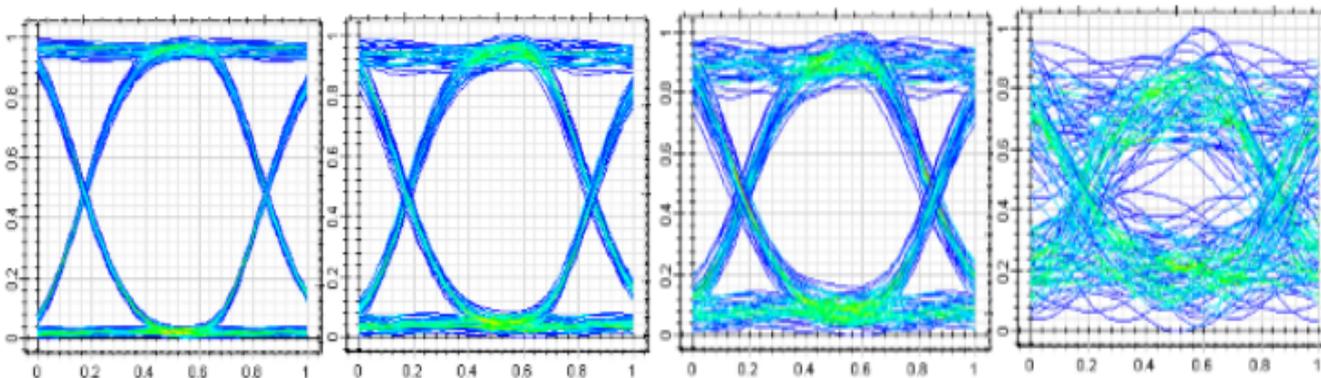
La figure 3.15 montre l'évaluation du diagramme de l'oeil enregistré à des distances de 1, 2, 3 et 5km, afin de confirmer les résultats sur la qualité de transmission. Nous avons une bonne qualité de transmission due à l'ouverture des diagrammes de l'oeil pour les trois modes dans les distances 1, 2 et 3km, au contraire pour le 3 eme mode a la distance de 5km du au perturbation.



(a) Diagramme obtenu pour 1er utilisateur (1er mode HG00)



(b) Diagramme obtenu pour 2eme utilisateur (2eme mode HG01)



(c) Diagramme obtenu pour 3eme utilisateur (3eme mode HG11)

FIGURE 3.15 – Evaluation du diagramme de l’oeil pour les 3 utilisateurs (3 modes) en fonction la distance.

3.6.3 L'effet du variation de débit

Dans cette partie on a étudié L'effet de variation du débit pour les 3 utilisateurs en variant notre plage du débit de 2Gbit/s jusqu'à 10Gbit/s, tout en conservant la longueur de la fibre a 6km.

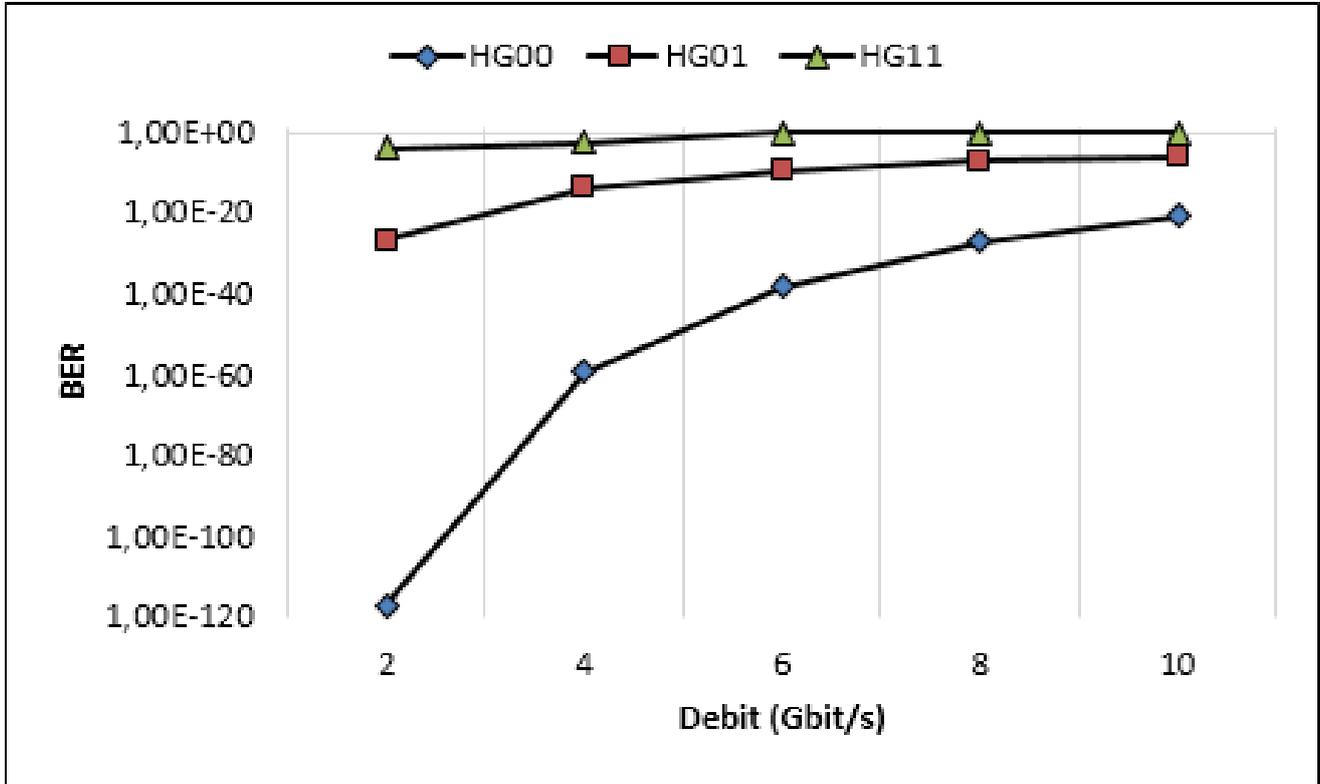
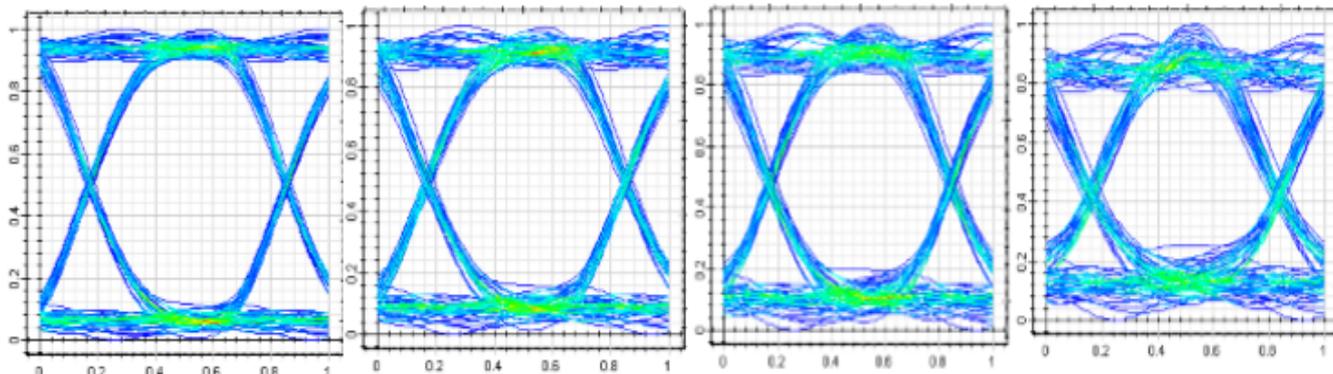


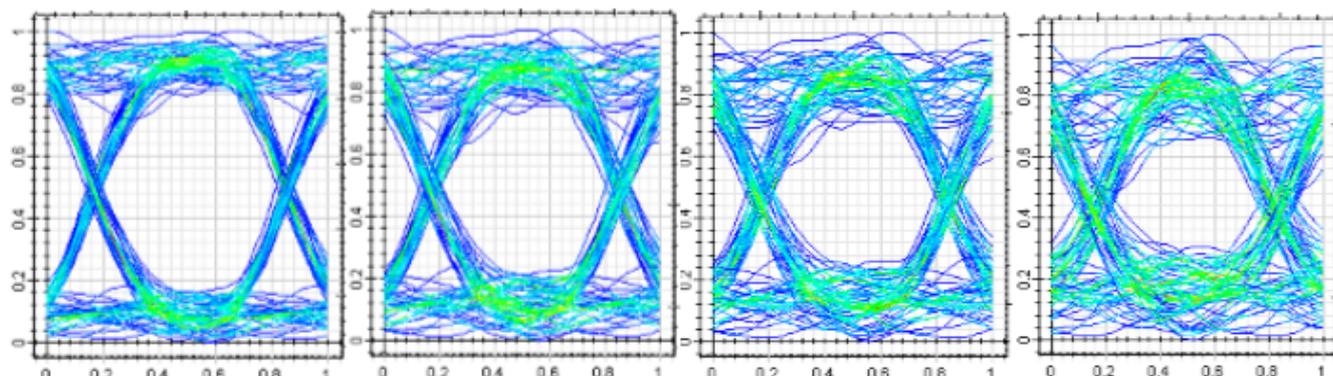
FIGURE 3.16 – BER en fonction de débit.

La figure 3.16 représente les résultats de simulation pour les différents débits, on remarque le 1 utilisateur (1er mode HG00) prend des valeurs de BER de 1E-120 jusqu'à 1E-30 pour le débit=10Gbit/s, le 2eme utilisateur (2eme mode HG01) prend la valeur de BER=1E-30 pour le débit =2Gbit/s jusqu'à une valeur presque égale à 1 pour le débit=10Gbit/s et pour le 3eme utilisateur (3eme mode HG11) prend des valeurs proches de 1 pour les débits 2Gbit/s et 4Gbit/s, et BER=1 à partir du débit=6 Gbit/s montre la présence du bruit et l'information n'est pas transmise.

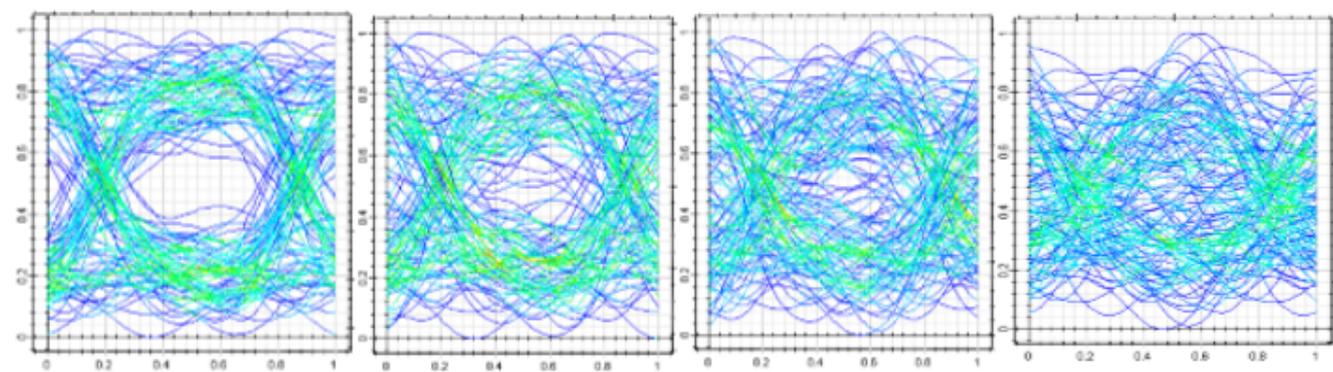
Afin d'examiner l'effet du débit sur les performances du système, nous avons représenté sur la figure 3.17 la variation du diagramme de l'oeil pour des débits de 2, 4, 6 et 10 Gbit/s ou on a fixé la longueur de la fibre a 6km, dont les mesures illustrent bien que l'oeil est bien ouvert pour le premier mode, cela revient à l'absence du phénomène de diaphonie. Par contre les mesures du 3eme mode montrent la fermeture de l'oeil et la présence du bruit qui indique l'existence du facteur d'interférence qui revient aux valeurs de BER=1 à des débits supérieurs ou égaux à 6Gbit/s.



(a) Diagramme obtenu pour 1er utilisateur (1er mode HG00)



(b) Diagramme obtenu pour 2eme utilisateur (2eme mode HG01)



(c) Diagramme obtenu pour 3eme utilisateur (3eme mode HG11)

FIGURE 3.17 – Evaluation du diagramme de l’oeil pour les 3 utilisateurs (3 modes) en fonction du débit.

3.7 Conclusion

Le but de ce chapitre était d'optimiser la chaîne de transmission avec les technique MDM et MCF. En utilisant le logiciel OPTISYSTEM qui permet de simplifier la conception et réduire le temps de simulation. Notre action était portée les débits de transmission pour aboutir finalement à des résultats permettant de valider les choix des techniques et des composants utilisés pour développer notre liaison sur une fibre multi coeurs .

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les réseaux de communication optiques, par lesquels transitent toutes les données d'internet, sont soumis à une croissance continue depuis les dernières décennies. Loin d'arriver à un seuil, l'émergence de nouvelles tendances génèrent de nouvelles contraintes sur ces canaux de communication.

De nombreuses stratégies sont d'ores et déjà utilisées pour accroître la capacité des fibres optiques comme le multiplexage temporel, en longueur d'onde, en polarisation ou en phase. Pourtant, les réseaux actuels approchent de la saturation.

Le multiplexage spatial ou SDM (Space Division Multiplexing) s'illustre comme la technologie de rupture pour dépasser ces limites et réaliser les réseaux optiques de demain. En utilisant plusieurs formes de lumière simultanément dans une fibre optique multimode comme autant de canaux indépendants, le multiplexage spatial permet d'accroître la capacité dans les fibres optiques. Mais générer et multiplexer de nombreuses formes de lumière reste complexe. Les multiplexeurs actuels sont fortement limités en nombre de modes, induisent des pertes importantes et sont peu sélectifs en mode, ce qui rend le traitement numérique du signal reçu beaucoup plus complexe.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Camille-Sophie Brès, "Communication par fibre optique : des Romains a nos jours ", école polytechnique, fededral de lausanne.
- [2] FARHAOUI Fatima Zohra et ZAIDI Fatima Zohra, "Etude et Simulation d'une Chaîne de Transmission Numérique sur Fibre Optique Haut Débit ", département d'électricité, université de Saida, 2017.
- [3] ZIBANI Karim, "Techniques de transmissions dans une fibre optique Etude et simulation", mémoire de master, Département de Génie Electrique, université de Bejaia, 2013.
- [4] Benjamin Damilano, Julien Brault, A. Dussaigne et Jean Massies, Centre de Recherche sur l'hétéroepitaxie et ses applications (CRHEA), CNRS, October 2001.
- [5] BILLAMI Hanane et BENDAHMANE Raouida, "Etude d'un réseau optique ADM 10Gbit/s", mémoire de Master, université abou-bker belkaid Tlemcen, juin 2013.
- [6] NGUYEN T-N, "Etude de composants optiques à base de fibres optiques nonlinéaires", Thèse de Doctorat, université de Rennes, 2008.
- [7] VICTOR g, " Simulation système et caractérisation d'une liaison radio sur fibre à modulation externe", thèse de doctorat, université Pierre et Marie Curie, 2016.
- [8] <https://www.memoireonline.com/09/13/7350/Les-differents-principes-de-transmission-des-donnees-par-fibre-optique.html>
- [9] MERROUCHE Lila, "Etude et optimisation des paramètres d'une liaison optique à SONATRACH (Béjaïa)", memoire de master, université Bejaia, 2013.
- [10] G.P. Agrawal. Nonlinear Fiber Optics. Elsevier Science, 2001.
- [11] MESLI Fatima Zohra et BENBARKA Imane, " laser a semi-conducteur dans les communications optique sécurisé par les chaos ", Mémoire master, Université Abou-Bakri Belkaid-Tlemcen, juin 2015.
- [12] Jérôme Laurent, "Communications optiques a très haut débit ", examain probatoire, spécialité électronique, 2004 a paris.

-
- [13] MEDJDOUB Fadila , "optimisation par la simulation système d'une chaîne de transmission numérique par fibre optique haut débit", mémoire de magister, université abou bker belkaid Tlemcen, 2010.
- [14] LAZREGUE Kamel, " Etude et réalisation d'une liaison optique à sortie variable pour multiplexage en puissance ", mémoire de magistère, département d'électronique, université d'oran, 2011.
- [15] I. Fsayfes, "Encodage et décodage temporels tout optique à réseaux de Bragg pour l'accès multiple", Thèse de doctorat, Ecole doctorale d'informatique et de Télécommunications et électronique de paris, 2007.
- [16] Koshiha M., Saitoh, K., Kokubun, Y. Heterogeneous multi-core fibers : proposal and design principles. *IEICE Electronics Express* 6, 98-103 (2009).
- [17] Winzer, P.J. Making spatial multiplexing a reality. *Nat. Photonics* 2014, 8, 345-348.
- [18] Richardson, D. J., J. M. Fini, and L. E. Nelson. "Space-division multiplexing in optical fibres." *Nature Photonics* 7.5 (2013) : 354-362.
- [19] Essiambre, R-J., et al. "Capacity limits of optical fiber networks." *Lightwave Technology, Journal of* 28.4 (2010) : 662-701.
- [20] Philippe Genevaux. "Le multiplexage de mode spatial pour augmenter le débit dans les fibres optiques ". *Optique [physics.optics]*. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2016.
- [21] Sillard, Pierre. "New fibers for ultra-high capacity transport." *Optical Fiber Technology* 17.5 (2011) : 495-502.
- [22] R. Thurston, E. Kapon, and Y. Silberberg, "Analysis of mode separation in multichannel branching waveguides," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 23, no. 8, pp. 1245-1255, Aug. 1987.
- [23] M. Koshiha, K. Saitoh, K. Takenaga, and S. Matsuo, "Multi-core fiber design and analysis : coupled-mode theory and coupled-power theory," *Opt. Express*, vol. 19, no. 26, pp. B102-B111, Dec. 2011.
- [24] S. Randel and P. Winzer, "DSP for mode division multiplexing," presented at the Opto Electronics and Communications Conference held jointly with 2013 International Conference on Photonics in Switching (OECC/PS), 2013 18th, 2013, pp. 1-2.
- [25] C. Koebele, M. Salsi, L. Milord, R. Ryf, C. A. Bolle, P. Sillard, S. Bigo, and G. Charlet, "40km Transmission of Five Mode Division Multiplexed Data Streams at 100Gb/s with low MIMO-DSP Complexity," presented at the 37th European Conference and Exposition on Optical Communications, 2011, p. Th.13.C.3.
- [26] Léonard Gagné-Godbout, "Modélisation, fabrication et caractérisation d'un amplificateur à fibre optique à sept coeurs dopés à l'erbium". 2014. Québec, Canada.
- [27] Winzer, Peter, et al. "Penalties from in-band crosstalk for advanced optical modulation formats." *European Conference and Exposition on Optical Communications. Optical Society of America*, 2011.

-
- [28] Imamura, Katsunori, Kazunori Mukasa, and Ryuichi Sugizaki. "Trench Assisted Multi-Core Fiber with Large Aeff over 100 μm^2 and Low Attenuation Loss." European Conference and Exposition on Optical Communications. Optical Society of America, 2011.
- [29] Imamura, Inaba et al. "Multi Core Fiber with Large Aeff of 140 μm^2 and Low Crosstalk." ECOC Technical Digest. Optical Society of America, 2012
- [30] Hayashi, Tetsuya, et al. "Design and fabrication of ultra-low crosstalk and low-loss multicore fiber." Optics express 19.17 (2011) : 16576-16592.
- [31] Koester, Charles J., and Elias Snitzer. "Amplification in a fiber laser." Applied Optics 3.10 (1964) : 1182-1186.
- [32] Ryf, R., et al. "MIMO-Based Crosstalk Suppression in Spatially Multiplexed 3 x 56-Gb/s PDM-QPSK Signals for Strongly Coupled Three-Core Fiber." Photonics Technology Letters, IEEE 23.20 (2011) : 1469-1471.
- [33] Ramachandran, Siddharth, et al. "Optical vortices in fibres : a new degree of freedom for mode multiplexing." European Conference and Exhibition on Optical Communication. Optical Society of America, 2012.
- [34] S. Matsuo, Y. Sasaki, T. Akamatsu, I. Ishida, K. Takenaga, K. Okuyama, K. Saitoh, and M. Koshiba, "12-core fiber with one ring structure for extremely large capacity transmission," Opt. Express, vol. 20, no. 27, pp. 28398-28408, Dec. 2012.
- [35] J. Sakaguchi, B. J. Puttnam, W. Klaus, Y. Awaji, N. Wada, A. Kanno, T. Kawanishi, K. Imamura, H. Inaba, K. Mukasa, R. Sugizaki, T. Kobayashi, and M. Watanabe, "19-core fiber transmission of 19x100x172-Gb/s SDM-WDM-PDM-QPSK signals at 305Tb/s," presented at the National Fiber Optic Engineers Conference, 2012, p. PDP5C.1.
- [36] Y. Sasaki, S. Saitoh, Y. Amma, K. Takenaga, S. Matsuo, K. Saitoh, T. Morioka, and Y. Miyamoto, "Quasi-single-mode homogeneous 31-core fibre," in 2015 European Conference on Optical Communication (ECOC), 2015, pp. 1-3.
- [37] J. Sakaguchi, Y. Awaji, N. Wada, A. Kanno, T. Kawanishi, T. Hayashi, T. Taru, T. Kobayashi, and M. Watanabe, "Space Division Multiplexed Transmission of 109-Tb/s Data Signals Using Homogeneous Seven-Core Fiber," J. Light. Technol., vol. 30, no. 4, pp. 658-665, Feb. 2012.
- [38] J. Sakaguchi, B. J. Puttnam, W. Klaus, Y. Awaji, N. Wada, A. Kanno, T. Kawanishi, K. Imamura, H. Inaba, K. Mukasa, R. Sugizaki, T. Kobayashi, and M. Watanabe, "19- 157 core fiber transmission of 19x100x172-Gb/s SDM-WDM-PDM-QPSK signals at 305Tb/s, presented at the National Fiber Optic Engineers Conference, 2012, p. PDP5C.1.
- [39] H. Takahashi, T. Tsuritani, E. Le Taillandier de Gabory, T. Ito, W.-R. Peng, K. Igarashi, K. Takeshima, Y. Kawaguchi, I. Morita, Y. Tsuchida, Y. Mimura, K. Maeda, T. Saito, K. Watanabe, K. Imamura, R. Sugizaki, and M. Suzuki, "First Demonstration of MC-EDFA-Repeatered SDM Transmission of 40 x 128-Gbit/s PDM-QPSK Signals per Core over 6,160-km 7-core MCF," presented at the European Conference and Exhibition on Optical Communication, 2012, p. Th.3.C.3.

- [40] H. Chen, V. Sleiffer, F. Huijskens, R. V. Uden, C. Okonkwo, P. Leoni, M. Kuschnerov, L. Gruner-Nielsen, Y. Sun, H. de Waardt, and T. Koonen, "Employing Prism-based 3-Spot Mode Couplers for High Capacity MDM/WDM Transmission," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. Early Access Online, 2013.
- [41] S. Matsuo, K. Takenaga, K. Saitoh, K. Nakajima, Y. Miyamoto, and T. Morioka, "High-spatial-multiplicity multi-core fibres for future dense space-division-multiplexing system," in *2015 European Conference on Optical Communication (ECOC)*, 2015, pp. 1-3.
- [42] Richardson, D. J., J. M. Fini, and L. E. Nelson. "Space-division multiplexing in optical fibres." *Nature Photonics* 7.5 (2013) : 354-362.
- [43] Zhu, B., et al. "112-Tb/s space-division multiplexed DWDM transmission with 14-b/s/Hz aggregate spectral efficiency over a 76.8-km seven-core fiber." *Optics Express* 19.17 (2011) : 16665-16671.
- [44] Sakaguchi, Jun, et al. "19-core fiber transmission of 19x100x172-Gb/s SDM-WDM-PDMQPSK signals at 305Tb/s." *National Fiber Optic Engineers Conference*. Optical Society of America, 2012.
- [45] Takara, Sano, et al. "1.01-Pb/s (12 SDM/222 WDM/456 Gb/s) Crosstalk-managed Transmission with 91.4-b/s/Hz Aggregate Spectral efficiency." *ECOC Postdeadline Papers*. Optical Society of America, 2012.
- [46] Saitoh, K., Matsuo, S. "Multicore fiber technology". *Journal of Lightwave Technology*, 34(1), 55-66, 2016.
- [47] Chen, H., Koonen, A. T. "Spatial division multiplexing". In *Fibre Optic Communication*, pp. 1-48, 2017.