الجـــــــــــــمهـوريـــــة الجـــــــــــــزائـريـة الديمـــــــقـراطيـة الشـــــــــعبيـة

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التـــــــــــــــــــــــــــــعـليـم العـــــــالي والبـــــــــــحث العـــــلـمـــي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جـــــــــــــــامعة أبي بكـــر بـلـقـايد – تـلمســـــــــــــــان –

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : TELECOMMUNICATION

Spécialité : Télécommunication optique

Par : LAHMER Ayoub
MECHERENENE Salim

Sujet

APPLICATION DE LA POLARISATION DE LA LUMIERE DANS LA TRANSMISSION HAUT-DEBIT

Soutenu publiquement, le 15 / 06 / 2026 , devant le jury composé de :

M Borsali Ahmed Riad	Professeur	Université de Tlemcen	Président
M Bousahla Miloud	Maître de Conférences	Université de Tlemcen	Examinateur
M Karim Fethallah	Professeur	Université de Tlemcen	Encadreur

Année universitaire :2025 /2026

Table des matières

Résumé
Abstract
ملخص
Remerciements
Dédicace
Liste des figures
Liste des tableaux
Liste des abréviations
Introduction générale 1
Chapitre 1 : Réseaux optiques et Fonctions 2
1.1 Introduction 4
1.2 Fondements de la communication par fibre optique 4
1.2.1 La fibre optique : principe et composition 4
1.2.2 Propagation de la lumière et lois de Snell-Descartes 5
1.2.3 Types de fibres optiques 6
1.2.4 Phénomènes de dégradation du signal optique 7
1.2.5 Chaîne de transmission optique 8
1.2.6 Critères d'évaluation des performances du système 9
1.3 Architectures des réseaux optiques 11
1.3.1 Architecture point à point (PtP) 11
1.3.2 Architecture point à multipoint (PtMP) 12
1.3.3 Réseau maillé (Mesh Network) 13
1.3.4 Réseau étoile (Star Network) 14
1.3.5 Tableau comparatif des architectures 15
1.4 Multiplexage optique 16
1.4.1 Multiplexage en longueur d'onde (WDM / DWDM) 16
1.4.2 Multiplexage temporel (TDM / OTDM) 17
1.4.3 Multiplexage par polarisation (PolMux / PDM). 18
1.4.4 Multiplexage spatial (SDM) 18
1.5 Routage optique 19
1.5.1 Commutation de circuits optiques (OCS) 19
1.5.2 Routage et assignation de longueurs d'onde (RWA). 20
1.5.3 Réseaux optiques élastiques (EON) 21
1.6 Filtrage optique 21
1.6.1 Filtres à réseau de Bragg en fibre (FBG) 22
1.6.2 Filtres interférométriques (Fabry-Perot, Mach-Zehnder) 22
1.6.3 Démultiplexeurs AWG (Arrayed Waveguide Grating) 23
1.6.4 Filtres accordables (tunable filters) 24
1.7 Modulation optique 25
1.7.1 Modulation d'intensité — détection directe (IM-DD) 25
1.7.2 Modulation de phase (BPSK, QPSK, DPSK) 25
1.7.3 Modulation cohérente et formats avancés (DP-QPSK, DP-nQAM) 26
1.7.4 Modulateurs optiques 27
1.7.5 Tableau comparatif des formats de modulation 28
1.8 Conclusion 28
Chapitre 2 : Généralités sur la polarisation de la lumière 30
2.1. Introduction 31
2.2. États de polarisation de la lumière 31
2.2.1. Polarisation linéaire 31

2.2.2. Polarisation circulaire 33
2.2.3. Polarisation elliptique 33
2.3. Formalisme mathématique de la polarisation 34
2.3.1. Vecteur de Jones 34
2.3.2. Paramètres de Stokes 35
2.3.3. Matrice de Mueller 36
2.4. Fibres optiques et polarisation 36
2.4.1. Fibres monomodes standard (SMF) 36
2.4.2. Fibres à maintien de polarisation (PMF) 37
2.4.3 Comparaison entre SMF et PMF 39
2.5. Composants de gestion de la polarisation 40
2.5.1. Diviseurs de polarisation (PBS) 40
2.5.2. Combinateurs de polarisation (PBC) 41
2.5.3. Contrôleurs de polarisation (PC) 42
2.6. Conclusion 43
Chapitre 3 : Réalisation expérimentale et évaluation de dispositifs optiques basés sur la polarisation 44
3.1. Introduction 44
3.2. Matériels, instruments et protocole général 45
3.3. Étude expérimentale du routage optique avec accessoires de polarisation 47
3.3.1. Réalisation d'un switch optique 1×2 basé sur des atténuateurs optiques 47
3.3.2. Description du montage 48
3.3.3. Résultats expérimentaux 48
3.3.4. Calcul du rapport de suppression 48
3.3.5. Analyse et discussion 49
3.4. Étude d'un séparateur de polarisation (PBS) 49
3.4.1. Objectif 49
3.4.2. Principe 49
3.4.3. Résultats et interprétations 50
3.5. Réalisation d'un switch optique avec accessoires de polarisation 50
3.5.1. Description du montage 50
3.6. Réalisation d'un système de secours optique via PBS/PBC 51
3.6.1. Principe de fonctionnement 51
3.6.3. Réalisation d'un multiplexeur optique 52
3.7. Réalisation et test d'un système de secours optique passif OLP 53
3.7.1. Objectif 53
3.7.2. Rôle du logiciel Dukto R6 54
3.7.3. Cas 1 : liaison de base avec polarisation 54
3.7.4. Cas 2 : Ajout d'une fibre de 1 km 54
3.7.5. Cas 3 : Variation de la longueur des deux lignes de transmission 55
3.8. Conclusion 58
CONCLUSION GÉNÉRALE 59
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 61

RÉSUMÉ

Ce travail porte sur la réalisation et le test de dispositifs optiques de routage, multiplexage et secours exploitant les accessoires de polarisation (PBS, PBC, fibres PM) et d'autres dispositifs comme les diviseurs, atténuateurs et filtres FWDM.

Ce mémoire montre l'intérêt des dispositifs de polarisation comme une solution alternative afin d'améliorer les caractéristiques des équipements optiques utilisés dans le routage, multiplexage et secours optique. Grâce à la séparation des polarisations orthogonales via le séparateur de polarisation (PBS), ce travail vise à améliorer le rapport de suppression de polarisation (PER) d'un switch optique et aussi augmenter le niveau d'isolation des canaux démultiplexés. Les accessoires de polarisation utilisés dans ce projet de fin d'étude seront utilisés pour assurer la continuité de transmission dans un système de secours passif sur une distance de 40 km.

Mots-clés : Séparateur de polarisation (PBS), combinateur de polarisation (PBC), routage optique, système de secours optique passif (Passive OLP), multiplexage par polarisation, atténuateur optique variable (VOA), rapport de suppression (ER), niveau d'isolation, rapport de suppression de polarisation (PER).

ABSTRACT

This work focuses on the implementation and testing of optical routing, multiplexing, and securing devices exploiting polarization components (PBS, PBC, PM fibers) and other devices such as splitters, attenuators, and FWDM filters.

This work demonstrates the interest of polarization devices as an alternative solution to improve the characteristics of optical equipment used in optical routing, multiplexing, and switching. Through the separation of orthogonal polarizations via the polarization beam splitter (PBS), this work aims to improve the extinction ratio (ER) of an optical switch and increase the isolation level of demultiplexed channels. The polarization components used in this project will be employed to ensure transmission continuity in a passive optical protection system over a distance of 40 km.

Keywords: Polarization beam splitter (PBS), polarization beam combiner (PBC), optical routing, passive optical line protection (Passive OLP), polarization multiplexing, variable optical attenuator (VOA), extinction ratio (ER), isolation level, polarization extinction ratio (PER).

ملخص

يركز هذا العمل على تصميم واختبار أجهزة التوجيه الضوئي، الدمج، و أنظمة ازدواجية القنوات الضوئية، باستخدام ملحقات الاستقطاب (مقسم الاستقطاب، مجمع الاستقطاب، ألياف الاستقطاب المتماثل) وأجهزة أخرى مثل المقسمات، والمخففات، ومرشحات FWDM.

تُبرز هذه الأطروحة أهمية أجهزة الاستقطاب كحل بديل لتحسين خصائص المعدات الضوئية المستخدمة في التوجيه، والدمج، والنسخ الاحتياطي الضوئي. ويهدف هذا العمل، من خلال فصل الاستقطابات المتعامدة باستخدام مقسم الاستقطاب (PBS)، إلى تحسين نسبة كبح الاستقطاب (PER) للمفتاح الضوئي، وزيادة مستوى عزل القنوات بعد فصلها. وسيتم استخدام ملحقات الاستقطاب المستخدمة في هذا المشروع لضمان استمرارية الإرسال في نظام نسخ احتياطي سلبي لمسافة 40 كيلومترًا.

الكلمات المفتاحية : مقسم الاستقطاب (PBS)، جامع الاستقطاب (PBC)، التوجيه البصري، نظام النسخ الاحتياطي البصري السلبي (Passive OLP)، تعدد إرسال الاستقطاب، مخفف بصري متغير (VOA)، نسبة الكبح (ER)، مستوى العزل، نسبة كبح الاستقطاب (PER)

Remerciements

Avant tout, nous rendons grâce à Dieu, le Tout-Puissant, qui nous a accordé la santé, la force, le courage et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce modeste travail et atteindre ce niveau d'études.

Nous adressons nos plus sincères et profonds remerciements à nos très chers parents, dont l'amour inconditionnel, les sacrifices, les encouragements constants et les précieuses prières ont été une source inestimable de motivation tout au long de notre parcours. Leur soutien moral et matériel, leur patience et leur confiance ont largement contribué à notre réussite.

Nous exprimons notre profonde gratitude à notre encadrant, Mr. KARIM Fethallah, pour avoir accepté de superviser ce travail. Nous le remercions chaleureusement pour sa disponibilité, ses conseils avisés, son accompagnement, ses remarques pertinentes ainsi que pour son soutien et sa bienveillance tout au long de la réalisation de ce projet.

Nos remerciements les plus respectueux s'adressent également aux membres du jury, Mr. BORSALI Ahmed Riad et Mr. BOUSAHLA Miloud, qui nous font l'honneur d'évaluer ce travail. Nous les remercions vivement pour l'intérêt qu'ils lui portent ainsi que pour leurs observations et suggestions qui contribueront à son enrichissement.

Enfin, nous exprimons notre reconnaissance à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont participé à la réalisation de ce mémoire et ont contribué à son aboutissement.

À tous, nous adressons nos plus sincères remerciements et notre profonde gratitude.

Dédicace

Avant tout, je rends grâce à Dieu, le Tout-Puissant, qui m'a accordé la santé, la force, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce modeste travail et atteindre ce niveau d'études.

J'adresse mes plus sincères remerciements à mes très chers parents pour leur amour infini, leurs sacrifices, leurs encouragements constants et leurs précieuses prières. Leur soutien moral et matériel, leur confiance ainsi que leur présence à mes côtés ont été une source de motivation tout au long de mon parcours académique.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon encadrant, Mr. KARIM Fethallah, pour avoir accepté de diriger ce travail. Je le remercie chaleureusement pour sa disponibilité, ses conseils judicieux, son suivi rigoureux, ses orientations pertinentes et son soutien constant qui ont grandement contribué à l'aboutissement de ce projet.

J'adresse également mes remerciements les plus respectueux aux membres du jury, Mr. BORSALI Ahmed Riad et Mr. BOUSAHLA Miloud, qui me font l'honneur d'évaluer ce mémoire. Je les remercie pour le temps consacré à son examen ainsi que pour leurs remarques et suggestions constructives.

Je souhaite également adresser un remerciement particulier à mon binôme, MECHERENENE Salim, pour son sérieux, son esprit de collaboration, son engagement et les efforts qu'il a fournis tout au long de la réalisation de ce projet. Travailler à ses côtés a été une expérience enrichissante qui a largement contribué à la réussite de ce mémoire.

Enfin, j'exprime ma reconnaissance à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail et m'ont apporté leur aide, leurs conseils ou leur soutien.

À toutes et à tous, j'adresse mes plus sincères remerciements et ma profonde gratitude

AYOUB

Dédicace

Avant tout, je rends grâce à Allah, le Tout-Puissant, qui m'a accordé la force, la patience et le courage nécessaires pour mener à bien ce travail.

Je dédie ce mémoire à mes très chers parents, pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices et leur soutien permanent tout au long de mes études. Aucun mot ne saurait exprimer ma profonde reconnaissance envers eux.

Une mention toute particulière est adressée à mon encadreur Mr. KARIM FETHALLAH, pour la qualité de son encadrement, ses orientations précieuses et sa disponibilité constante, qui ont été déterminants dans la réussite de ce mémoire.

Je dédie également ce travail à ma famille, mes amis et collègues, qui ont partagé avec moi les moments de travail, de doute et de réussite.

Une pensée toute particulière à mon cher ami et binôme LAHMER Ayoub, dont le soutien, l'esprit d'équipe et l'engagement ont grandement contribué à l'aboutissement de ce projet commun.

À tous ceux qui ont cru en moi et accompagné mon parcours, je dédie ce mémoire avec respect et profonde gratitude.

SALIM

Liste des figures

Figure 1.1 : Structure de base d'une fibre optique [1][14] 4
Figure 1.2 : Réflexion totale interne et lois de Snell-Descartes [1][15] 5
Figure 1.3 : Types de fibres optiques et fenêtres d'atténuation spectrale [1][10]. 6
Figure 1.4 : Principaux phénomènes de dégradation du signal optique [1][2] 7
Figure 1.5 : Chaîne de transmission complète par fibre optique [1][14] 8
Figure 1.6 : BER, facteur Q et diagramme de l'œil [1][16] 10
Figure 1.7 : Architecture point à point [7][13] 11
Figure 1.8 : Architecture point à multipoint — réseau PON [9][13] 12
Figure 1.9 : Réseau maillé full mesh et partial mesh [13][17] 13
Figure 1.10 : Architecture en étoile [13] 14
Figure 1.11 : Principe du multiplexage WDM/DWDM [2][8] 15
Figure 1.12 : Multiplexage TDM et OTDM [1][2] 16
Figure 1.13 : Multiplexage par polarisation PDM/PolMux [12][16] 17
Figure 1.14 : Variantes du multiplexage spatial SDM [2] 18
Figure 1.15 : Comparaison des équipements de routage optique (OADM, ROADM et OXC) 19
Figure 1.16 : RWA — Routing and Wavelength Assignment [17] 20
Figure 1.17 : Réseaux EON et Flex-Grid [4][6] 20
Figure 1.18 : Filtre à réseau de Bragg FBG [11] 21
Figure 1.19 : Filtres Fabry-Perot et Mach-Zehnder [11][14] 22
Figure 1.20 : Architecture du démultiplexeur AWG [1][8] 23
Figure 1.21 : Filtres accordables LCOS, MEMS et WSS [4][17] 23
Figure 1.22 : Formats NRZ-OOK et PAM4 [5][16] 24
Figure 1.23 : Constellations BPSK, DPSK et QPSK [12][16] 25
Figure 1.24 : DP-QPSK, DP-16QAM et DP-64QAM [12][16] 26
Figure 1.25 : Modulateurs optiques MZM, IQ et EAM [1][12] 27
Figure 2.1 : États fondamentaux de polarisation de la lumière [21] 32
Figure 2.2 : Représentation des états de polarisation et de la sphère de Poincaré [19][22] 33
Figure 2.3 : Effet de la biréfringence aléatoire dans une fibre monomode standard (SMF) [32] 36
Figure 2.4 : Structure d'une fibre à maintien de polarisation de type PANDA [27] 37
Figure 2.5 : Fibre à cœur elliptique pour le maintien de la polarisation [28] 37
Figure 2.6 : Comparaison de la longueur de battement dans les fibres SMF et PMF [26] 38
Figure 2.7 : Exemples de fibres à maintien de polarisation : PANDA, Bow-Tie et cœur elliptique [27] 38
Figure 2.8 : Principe de fonctionnement d'un séparateur de faisceau polarisant (PBS) [29] 40
Figure 2.9 : Dispositif de mesure : injection du signal via le Bidi A vers le port 3 (port SM), mesure de la puissance optique sur le port 2 (axe rapide) et le port 1 (axe lent) à l'aide de deux OPMs, avec un seul PBS. [33] 41
Figure 2.10 : Architectures des contrôleurs de polarisation (PC) : contrôleur à fibre de Lefevre et contrôleur électro-optique [31] 42
Figure 3.1 : Quelques composants et accessoires utilisés dans les essais expérimentaux. 46
Figure 3.2 : Montage expérimental de couplage optique avec switch et mesure de puissance. 47
Figure 3.3 : Montage de séparation des composantes de polarisation par un PBS. 49
Figure 3.4 : Principe de fonctionnement d'un diviseur de polarisation (PBS). 49
Figure 3.5 : Architecture interne PBS/PBC. 50
Figure 3.6 : Montage de couplage optique avec séparation de polarisation en sortie. 51
Figure 3.7 : Séparateur/combinateur hybride de polarisation PBS/PBC 51
Figure 3.8 : Redondance de liaison à deux voies entre PBS et PBC. 52
Figure 3.9 : Première architecture de comparaison basée sur des coupleurs passifs. 53
Figure 3.10 : Seconde architecture de comparaison basée sur PBS/PBC. 53
Figure 3.11 : Cas 1 du système OLP : liaison de base utilisant PBS, switch et PBC. 54
Figure 3.12 : Cas 2 : montage OLP avec environ 1 km de fibre sur une des voies. 54
Figure 3.13 : Cas 3 : montage OLP avec environ 31 km de fibre sur une des voies. 55
Figure 3.14 : Variation de puissance au niveau Bidi A en fonction de la différence de longueur 56
Figure 3.15 : Variation de puissance au niveau Bidi B en fonction de la différence de longueur. 57
Figure 3.16 : Variation de la latence pour une différence de longueur aux instants tn 57

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Paramètres de Stokes et leur signification physique [22][30] 34
Tableau 2.2 : Comparaison entre les fibres SMF et PMF 39
Tableau 3.1 : Caractéristiques des accessoires optiques 46
Tableau 3.2 : Caractéristiques des accessoires optiques 47
Tableau 3.3 : Résultats de mesure pour PBS 50
Tableau 3.4 : Résultats de mesure pour le switch avec PBS/PBC 2×2 51
Tableau 3.5 : Résultats de mesure pour un système de secours avec PBS/PBC 52

Liste des abréviations

AWG : Arrayed Waveguide Grating (Démultiplexeur à réseau de guides d'ondes)

BER : Bit Error Rate (Taux d'erreur binaire)

BPSK : Binary Phase Shift Keying (Modulation de phase binaire)

DWDM : Dense Wavelength Division Multiplexing

EAM : Electro-Absorption Modulator (Modulateur à électro-absorption)

EDFA : Erbium Doped Fiber Amplifier (Amplificateur à fibre dopée erbium)

EON : Elastic Optical Network (Réseau optique élastique)

ER : Extinction Ratio (Rapport d'extinction)

FBG : Fiber Bragg Grating (Réseau de Bragg en fibre)

FWDM : Filter Wavelength Division Multiplexing

IM-DD : Intensity Modulation / Direct Detection (Modulation d'intensité / détection directe)

IQ : In-phase / Quadrature (Composantes en phase et en quadrature)

LCOS : Liquid Crystal on Silicon

MEMS : Micro-Electro-Mechanical Systems

MZM : Mach-Zehnder Modulator (Modulateur de Mach-Zehnder)

OADM : Optical Add-Drop Multiplexer

OCS : Optical Circuit Switching (Commutation de circuits optiques)

OLP : Optical Line Protection (Système de protection de ligne optique)

OPM : Optical Power Meter (Mesureur de puissance optique)

OTDM : Optical Time Division Multiplexing

OXC : Optical Cross-Connect

PAM4 : Pulse Amplitude Modulation à 4 niveaux

PBC : Polarization Beam Combiner (Combinateur de faisceau polarisé)

PBS : Polarization Beam Splitter (Séparateur de faisceau polarisé)

PC : Polarization Controller (Contrôleur de polarisation)

PDM : Polarization Division Multiplexing (Multiplexage par division de polarisation)

PER : Polarization Extinction Ratio (Rapport de suppression de polarisation)

PM : Polarization Maintaining (Maintien de polarisation)

PMD : Polarization Mode Dispersion (Dispersion modale de polarisation)

PMF : Polarization Maintaining Fiber (Fibre à maintien de polarisation)

PolMux : Polarization Multiplexing (Multiplexage par polarisation)

PON : Passive Optical Network (Réseau optique passif)

QAM : Quadrature Amplitude Modulation

QPSK : Quadrature Phase Shift Keying

ROADM : Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer

RWA : Routing and Wavelength Assignment (Routage et assignation de longueur d'onde)

SDM : Space Division Multiplexing (Multiplexage spatial)

SMF : Single Mode Fiber (Fibre monomode)

TDM : Time Division Multiplexing (Multiplexage temporel)

TIR : Total Internal Reflection (Réflexion totale interne)

VOA : Variable Optical Attenuator (Atténuateur optique variable)

WDM : Wavelength Division Multiplexing (Multiplexage par division en longueur d'onde)

WSS : Wavelength Selective Switch

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les réseaux de télécommunications connaissent depuis plusieurs décennies une croissance exponentielle des débits exigés, portée par l'explosion des services numériques, du cloud computing, de la 5G/6G et des applications d'intelligence artificielle. Cette évolution a conduit au déploiement massif des infrastructures entièrement optiques, capables de transporter des capacités de l'ordre du térabit par seconde sur de très longues distances grâce au multiplexage en longueur d'onde (WDM/DWDM) et aux techniques de modulation avancées.

Cependant, l'augmentation continue de la capacité et les exigences de disponibilité posent de nouveaux défis : gestion efficace des ressources spectrales, réduction des temps de rétablissement en cas de panne, et optimisation des coûts d'infrastructure. Dans ce contexte, la **polarisation de la lumière**, traditionnellement considérée comme une contrainte (PMD), est devenue une ressource exploitable. Le multiplexage par polarisation (PDM/PolMux), combiné à la détection cohérente, a permis de doubler l'efficacité spectrale des systèmes 100G, 400G et au-delà. Par ailleurs, les composants de gestion de la polarisation (PBS, PBC, contrôleurs) offrent de nouvelles possibilités pour le routage, la commutation et la protection des signaux optiques.

Ce mémoire s'inscrit dans cette dynamique. Il vise à **concevoir, réaliser et évaluer expérimentalement des dispositifs optiques de routage, multiplexage et secours** en s'appuyant sur les propriétés de polarisation de la lumière et des accessoires optiques disponibles au laboratoire de Télécommunications (LTT).

Ce mémoire de fin d'étude est divisé en trois parties. Le chapitre 1 présente des généralités sur les réseaux optiques. En chapitre 2, nous allons définir la polarisation de la lumière, ses caractéristiques, paramètres, les accessoires utilisés et leurs différentes applications. En chapitre 3, nous allons présenter les différents montages réalisés dans le cadre de ce mémoire. Cette partie pratique est divisée en trois volets suivant leur application. La première application consiste à réaliser et analyser un routeur 1×2 optique basé sur un PBS, PBC et des atténuateurs optiques (VOA). Dans la deuxième partie, un multiplexeur 2×1 sera réalisé en utilisant des accessoires de polarisation visant à améliorer le niveau d'isolation des canaux. Dans la dernière partie de ce travail, un système de secours optique sera réalisé et testé utilisant un PBS et un PBC. Des atténuateurs fixes seront insérés dans ce système de secours pour varier les longueurs de la ligne primaire et secondaire et voir la performance du système.

Chapitre 1

Réseaux optiques et leurs fonctions

1.1 Introduction

Les réseaux de télécommunications ont connu une évolution remarquable au cours des dernières décennies, passant de liaisons cuivrées à faible débit vers des infrastructures entièrement optiques capables d'acheminer des débits de l'ordre du térabit par seconde sur des distances intercontinentales. Cette révolution a été rendue possible grâce au développement de la fibre optique comme un support de transmission, combiné à l'apparition de composants actifs et passifs sophistiqués permettant de traiter le signal directement dans le domaine optique.

Un réseau optique est un ensemble d'équipements et de liaisons à base de fibres optiques permettant d'assurer le transport, le routage et la commutation du flux d'information entre des points d'origine et des points de destination, en exploitant les propriétés physiques de la lumière. Contrairement aux réseaux électroniques traditionnels, les réseaux optiques permettent de transporter simultanément plusieurs centaines de canaux sur une même fibre grâce au multiplexage en longueur d'onde (WDM — Wavelength Division Multiplexing), sans nécessiter de conversion optique-électronique-optique à chaque nœud intermédiaire. [1]

Ce chapitre présente les fondements des réseaux optiques modernes en abordant successivement les bases physiques de la fibre optique et de la chaîne de transmission, de la source lumineuse au récepteur. Puis, les architectures topologiques fondamentales des réseaux, et enfin les fonctions optiques essentielles qui les animent : le multiplexage, le routage, le filtrage et la modulation. Ces notions constituent le socle indispensable à la compréhension des systèmes étudiés dans les chapitres suivants. [1][13]

1.2 Fondements de la communication par fibre optique

1.2.1 La fibre optique : principe et composition

La fibre optique est le support de transmission fondamental des réseaux optiques modernes. Elle est capable d'acheminer une intensité lumineuse entre deux points distants de plusieurs centaines de kilomètres grâce au mécanisme de confinement du champ lumineux le long de la ligne optique. Les fibres optiques sont des filaments très fins, conçus à base de dioxyde de silicium (SiO_2), un matériau qui présente une absorption ultrabasse dans les fenêtres de longueurs d'onde des communications optiques, notamment dans le proche infrarouge (850 nm, 1300 nm et 1550 nm). [1][15]

La structure de base d'une fibre optique comporte : un noyau central appelé cœur (de 9 µm ou 50 µm de diamètre selon le type), dans lequel la lumière se propage ; une gaine diélectrique d'un diamètre standard de 125 µm ayant un indice de réfraction légèrement

inférieur à celui du cœur, afin d'assurer le confinement de la lumière ; un revêtement externe en polymère de 250 µm de diamètre pour protéger la fibre contre les contraintes mécaniques et environnementales ; et enfin une enveloppe protectrice externe de 900 µm de diamètre. [1][14]. La Figure 1.1 montre la structure de base d'une fibre optique.

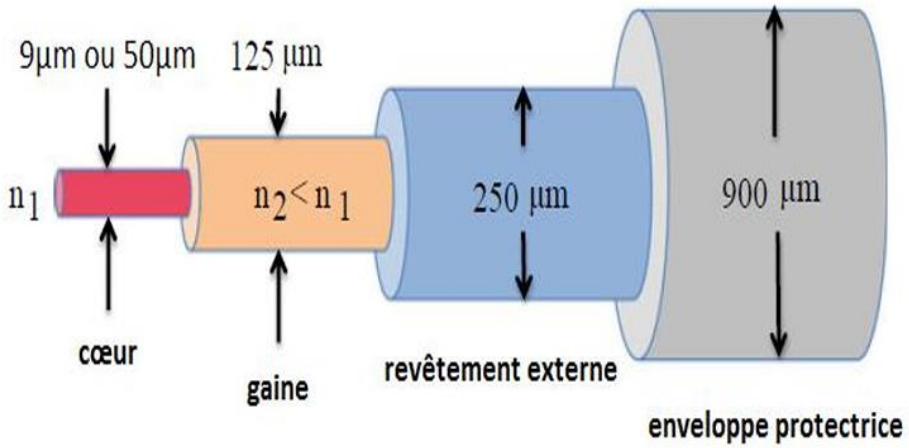


Figure 1.1 : Structure de base d'une fibre optique [1][14]

1.2.2 Propagation de la lumière et lois de Snell-Descartes

Pour que la lumière reste confinée à l'intérieur du cœur de la fibre, il est essentiel que l'indice de réfraction du cœur n1 soit légèrement supérieur à celui de la gaine n2. En s'appuyant sur les lois de Snell-Descartes, lorsqu'un rayon lumineux heurte l'interface cœur-gaine avec un angle supérieur à l'angle critique θc, il subit une réflexion totale interne (TIR : Total Internal Reflection) et reste confiné dans le cœur (voir Figure 1.2). L'angle critique est défini par la relation :

$$\theta c = \arcsin(n_2/n_1) \quad (1.1)$$

L'ouverture numérique (ON) d'une fibre caractérise l'angle d'injection maximal permettant la propagation guidée :

$$ON = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} \quad (1.2)$$

La différence d'indice requise entre cœur et gaine est typiquement de l'ordre de 0,3 %.

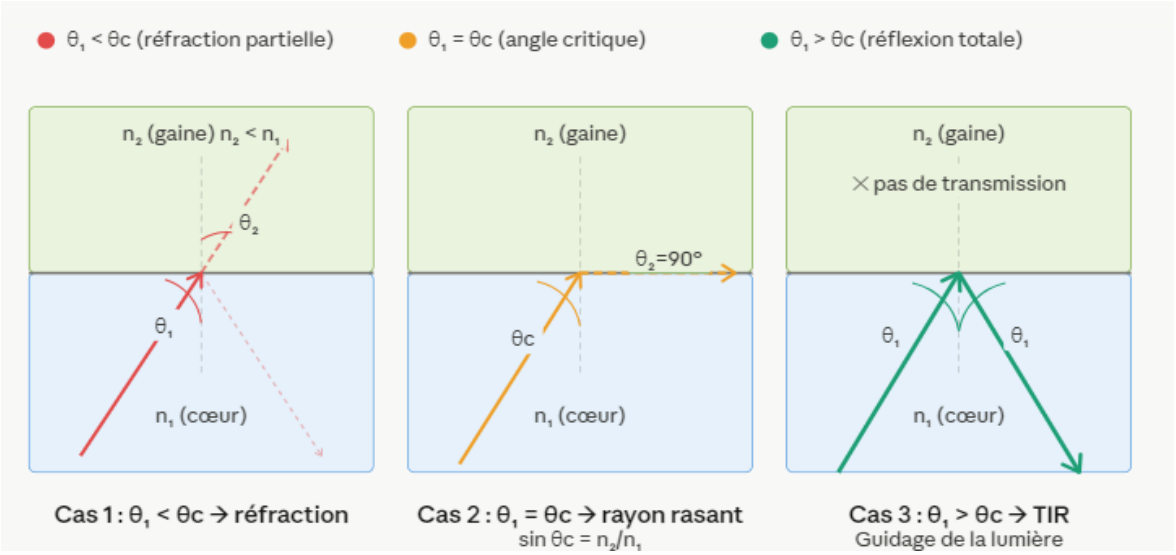


Figure 1.2 : Réflexion totale interne et lois de Snell-Descartes [1][15]

1.2.3 Types de fibres optiques

On distingue deux grandes catégories de fibres selon la valeur de la fréquence normalisée

$$V = (2\pi a/\lambda) \cdot ON = (2\pi a/\lambda) \cdot \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} \qquad (1.3)$$

Où a est le rayon du cœur et λ la longueur d'onde :

- **Fibre monomode (SMF — Single Mode Fiber)**

Distinguée par un cœur de 8 à 12 µm de diamètre (V ≤ 2,405), la fibre monomode ne permet qu'un seul mode de propagation (en ligne droite), aux longueurs d'onde de 1300 nm et 1550 nm. Grâce à l'absence de dispersion intermodale et à une atténuation minimale autour de 0,2 dB/km à 1550 nm, elle est la technologie de référence pour les liaisons longue distance et les réseaux FTTH. [1]

- **Fibres multimodes (MMF — Multi Mode Fiber)**

Caractérisée par un cœur de plus de 50 µm (V > 2,405), la fibre multimode permet la propagation simultanée de plusieurs modes. On distingue deux sous-types : la fibre MMF à saut d'indice (profil d'indice uniforme dans le cœur, faible débit, typiquement 50 Mbit/s) et la fibre MMF à gradient d'indice (l'indice diminue progressivement du centre vers la gaine, réduisant la dispersion intermodale et autorisant des débits de 34 à 140 Mbit/s sur des distances de 10 à 20 km). Les fibres monomodes sont utilisées dans les réseaux longue distance et les déploiements FTTH, tandis que les fibres multimodes sont privilégiées pour les réseaux locaux et les courtes distances.

La Figure 1.3 présente les différents types de fibres optiques et les fenêtres d'atténuation spectrale.

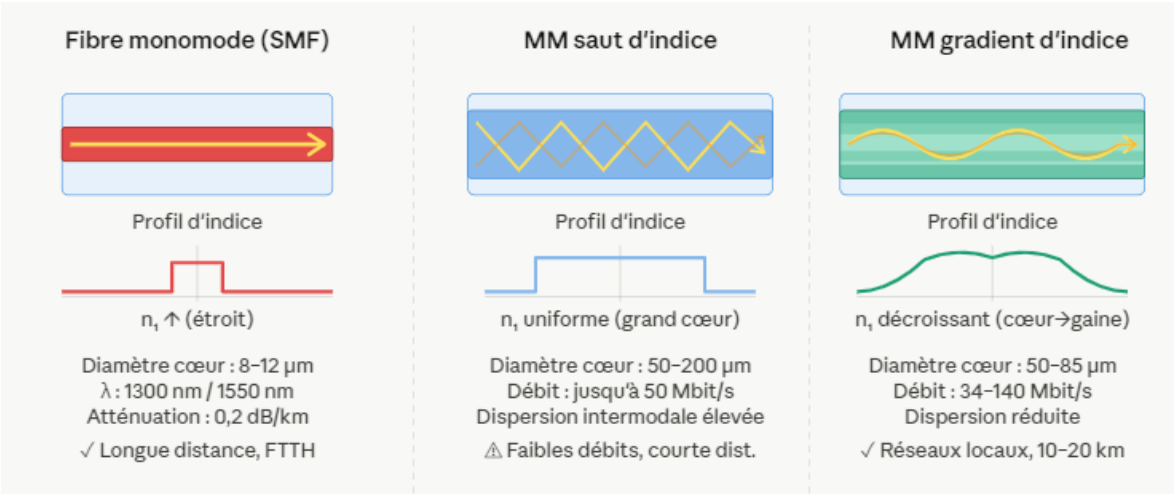


Figure 1.3 : Types de fibres optiques et fenêtres d'atténuation spectrale [1][10].

1.2.4 Phénomènes de dégradation du signal optique

Bien que la propagation sur fibre optique soit très performante, plusieurs phénomènes viennent dégrader le signal lors de son acheminement. On distingue les effets linéaires et les effets non linéaires.

- **Effets linéaires**

L'atténuation désigne l'affaiblissement exponentiel de la puissance du signal en fonction de la longueur de la fibre, exprimée en dB/km. La fibre monomode présente une atténuation minimale de 0,2 dB/km à 1550 nm comme le montre la figure 1.4, valeur très inférieure aux câbles électriques coaxiaux (100 à 1000 dB/km). La dispersion chromatique (D, en ps/nm·km) est due à la variation de la vitesse de propagation des différentes composantes spectrales du signal : chaque impulsion lumineuse étant composée de plusieurs longueurs d'onde, celles-ci arrivent à des instants différents au récepteur, limitant ainsi la distance et le débit de transmission. La dispersion modale de polarisation (PMD) est un autre type de dispersion provoquée par la biréfringence résiduelle de la fibre, qui entraîne un étalement temporel des impulsions.

➢ **Effets non linéaires**

Lorsque la puissance optique injectée est élevée, des effets non linéaires apparaissent et peuvent perturber la propagation. La silice est principalement sujette aux effets non linéaires du troisième ordre, parmi lesquels : l'effet Kerr optique (variation de l'indice de réfraction avec l'intensité du champ électrique), le mélange à quatre ondes (FWM : Four-Wave Mixing, génère de nouvelles longueurs d'onde parasites dans les systèmes WDM), et les diffusions stimulées Brillouin (SBS) et Raman (SRS) qui transfèrent de l'énergie vers des fréquences décalées. Ces effets deviennent critiques dans les systèmes DWDM longue distance et doivent être pris en compte lors de la conception du bilan de liaison.

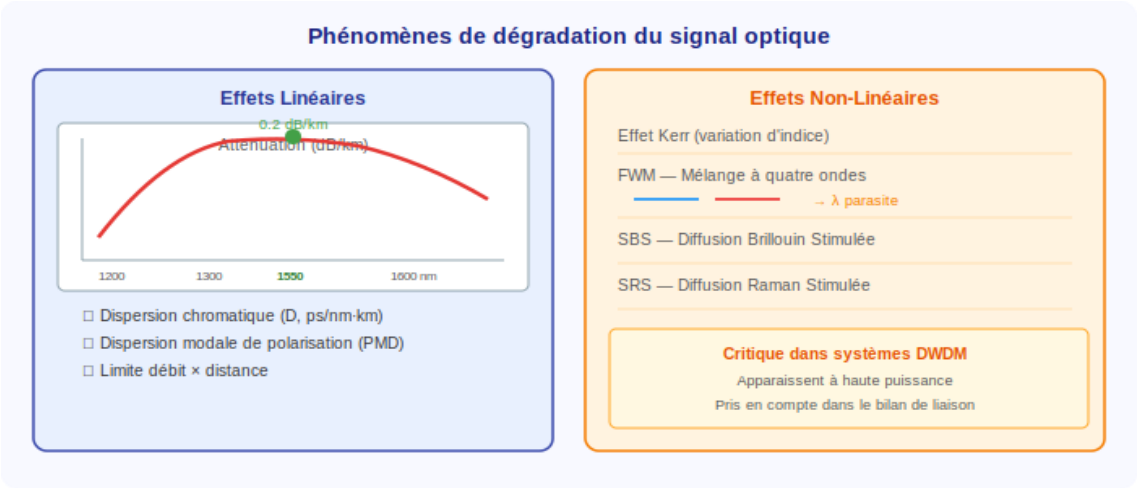


Figure 1.4 : Principaux phénomènes de dégradation du signal optique [1][2]

1.2.5 Chaîne de transmission optique

Une chaîne de transmission par fibre optique se compose de trois blocs principaux : l'émetteur, le support optique (la fibre) et le récepteur.

Bloc émetteur : sources et modulateurs

Le bloc émetteur génère le signal optique porteur des données. Il comprend une source de lumière et un système de modulation. Deux types de sources sont utilisés : la diode électroluminescente (DEL ou LED), qui émet une lumière polychromatique non cohérente et convient aux fibres multimodes pour des débits limités ; et la diode LASER, qui émet une lumière monochromatique, directionnelle et cohérente (longueurs d'onde de 1300 nm à 1550 nm), compatible avec les fibres monomodes et multimodes, avec des débits atteignant 10 Gbit/s. Les formats de modulation au niveau du signal électrique (NRZ, RZ, Duobinary...) permettent d'encoder les données avant leur impression sur la porteuse optique. La

modulation externe, via des modulateurs Mach-Zehnder (MZM) ou à électro-absorption (EAM), est privilégiée pour les hauts débits car elle limite l'effet de chirp (élargissement spectral parasite), contrairement à la modulation directe.

Bloc récepteur : photodétecteurs

Le bloc récepteur convertit le signal optique reçu en signal électrique exploitable. L'élément clé est le photodétecteur. La photodiode PIN (Positive Intrinsèque Négative) est la plus courante : elle fonctionne en polarisation inverse et exploite la large zone intrinsèque pour maximiser l'absorption des photons et la génération d'un photocourant. Sa sensibilité, exprimée en A/W, dépend de la longueur d'onde et du rendement quantique. La photodiode à avalanche (APD : Avalanche Photo Detector) offre un gain interne supplémentaire par multiplication des porteurs en régime d'avalanche (polarisation proche de la tension de claquage), ce qui la rend plus sensible mais aussi plus coûteuse. Les performances du récepteur sont quantifiées par son rendement quantique (η), sa sensibilité spectrale ($\mathscr{R}$) et son courant d'obscurité.

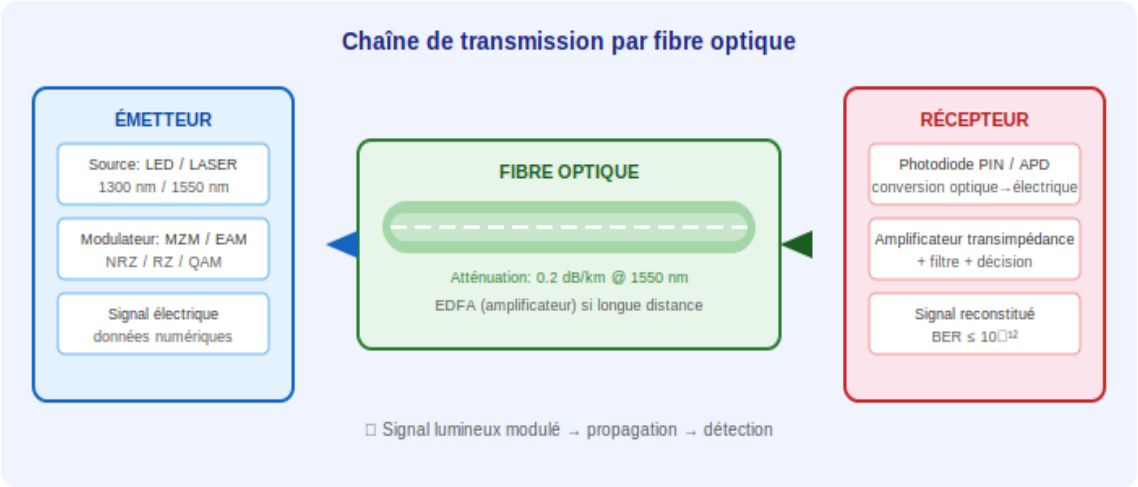


Figure 1.5 : Chaîne de transmission complète par fibre optique [1][14]

1.2.6 Critères d'évaluation des performances du système

Une fois le système de transmission optique mis en place, plusieurs critères permettent d'évaluer ses performances. Ces critères sont directement liés aux résultats de simulation sur le logiciel (OptiSystem, VPIphotonics...) et permettent de valider les choix de conception. [1][16]

Taux d'erreur binaire (BER : Bit Error Rate)

Le BER est le critère le plus direct pour évaluer la qualité d'une transmission numérique. Il est défini par le rapport entre le nombre de bits reçus en erreur et le nombre

total de bits transmis : BER = Nombre de bits erronés / Nombre de bits transmis. Une valeur typique acceptable pour les réseaux optiques est BER ≤ 10^{-12}. Le BER est directement utilisé comme critère de validation dans les simulations et les expérimentations des systèmes FTTH. [1][16]

Facteur de qualité Q

Le facteur de qualité Qconstitue un critère complémentaire au taux d'erreur binaire (BER). Il est déterminé à partir des statistiques de bruit associées aux niveaux logiques « 1 » et « 0 » du signal détecté. Il s'exprime par la relation suivante :

$$Q = (\mu_1 - \mu_0) / (\sigma_1 + \sigma_0) \quad (1.4)$$

Où :

- μ_1 et μ_0 représentent les valeurs moyennes des niveaux logiques « 1 » et « 0 » ;
- σ_1 et σ_0 désignent les écarts-types du bruit associés à ces deux niveaux.

En pratique, un facteur de qualité élevé correspond généralement à un taux d'erreur binaire faible.

$$BER \leq 10^{-12}$$

Ce qui constitue le seuil de référence pour garantir une transmission fiable dans les systèmes de télécommunications optiques modernes.

Diagramme de l'œil et bilan énergétique

Le diagramme de l'œil est un outil visuel permettant d'évaluer la qualité du signal en superposant tous les symboles binaires dans le domaine temporel. Un « œil » bien ouvert indique une bonne discrimination entre les niveaux « 0 » et « 1 », tandis qu'un œil ferme traduit une dégradation excessive du signal. Le bilan énergétique de la liaison optique exprime, quant à lui, la marge disponible entre la puissance émise dans la fibre et la sensibilité du récepteur ; il conditionne la portée maximale du système et le nombre de composants passifs (diviseurs, connecteurs) pouvant être insérés dans la liaison. [1][14]

La Figure 1.6 illustre les critères d'évaluation de la qualité de transmission (BER, facteur Q et diagramme de l'œil).

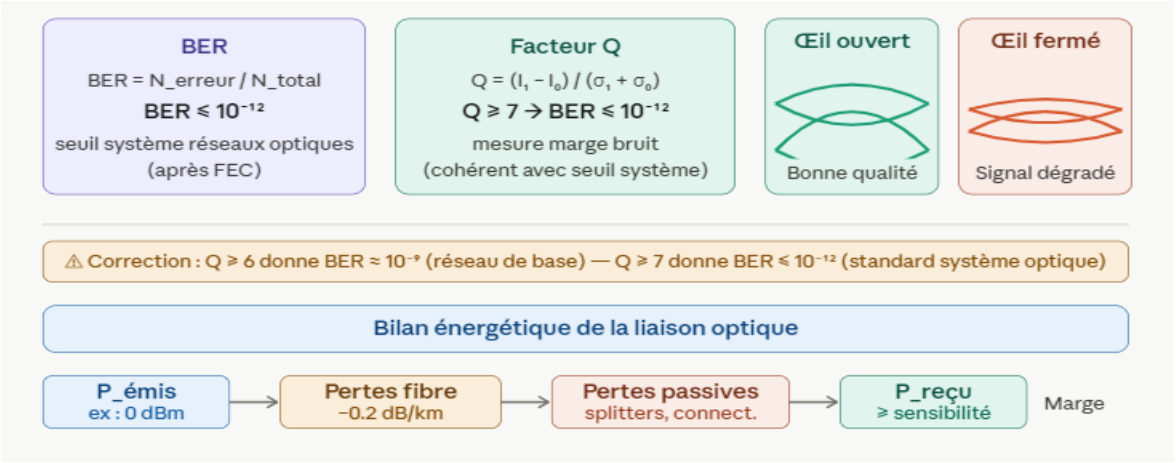


Figure 1.6 : BER, facteur Q et diagramme de l'œil [1][16]

1.3 Architectures des réseaux optiques

La topologie d'un réseau optique désigne la manière dont les nœuds (équipements actifs ou passifs) et les liens (fibres optiques) sont organisés et interconnectés. Le choix de l'architecture conditionne directement les performances du réseau en termes de capacité, de résilience, de coût de déploiement et de facilité d'évolution. On distingue quatre architectures fondamentales dans les réseaux optiques actuels.

1.3.1 Architecture point à point (PtP)

L'architecture point à point est la topologie la plus simple : elle établit une liaison optique directe et dédiée entre deux nœuds. Chaque lien est constitué d'une ou plusieurs fibres optiques reliant un émetteur à un récepteur, éventuellement avec des amplificateurs optiques intermédiaires (EDFA — Erbium-Dopé Fiber Amplifier) pour compenser l'atténuation sur les longues distances.

Ce type d'architecture est caractérisé par une bande passante dédiée et une latence minimale, comme on peut l'observer sur la figure 1.7. Puisque le signal ne subit aucun traitement intermédiaire de routage ou de commutation, cette architecture est utilisée principalement dans des liaisons longue distance (backbone transocéanique, liaisons inter-datacenters), dans des connexions entre deux sites distants à très haut débit, et dans les systèmes de transport WDM ou chaque longueur d'onde constitue un canal point à point indépendant.

La principale limitation de cette architecture réside dans son manque de flexibilité : toute modification de la topologie (ajout de nœud, redirection de trafic) nécessite une intervention physique sur l'infrastructure. De plus, l'efficacité spectrale est sous-optimale

lorsque le trafic est faible ou irrégulier, car la capacité du lien est réservée intégralement même en l'absence de données.

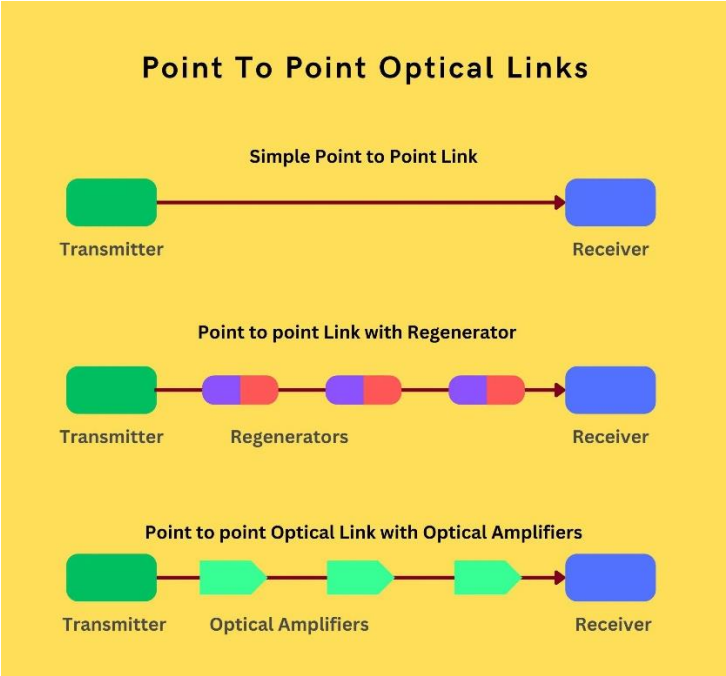


Figure 1.7 : Architecture point à point [7][13]

1.3.2 Architecture point à multipoint (PtMP)

L'architecture point à multipoint (voir La Figure 1.8) permet à un nœud central (tête de réseau ou OLT — Optical Line Terminal) de desservir simultanément plusieurs nœuds terminaux (ONT/ONU — Optical Network Terminal/Unit) via un réseau de distribution optique passif (ODN — Optical Distribution Network). Cette architecture est au cœur des réseaux d'accès à fibre optique (FTTx — Fiber To The x) et notamment des réseaux PON (Passive Optical Network).

Le partage du canal optique entre plusieurs utilisateurs est réalisé grâce à des coupleurs ou diviseurs optiques passifs (splitters), qui répartissent la puissance optique entre les différents abonnés. Les principales variantes standardisées sont le GPON (Gigabit PON, ITU-T G.984), l'XGPON (10 Gbit/s, ITU-T G.987), le NGPON2 (40 Gbit/s, ITU-T G.989) et le 50G-PON (ITU-T G.9804) pour les déploiements les plus récents.

Les avantages de cette architecture sont son faible coût de déploiement (infrastructure passive partagée, absence d'alimentation électrique dans l'ODN), sa scalabilité (jusqu'à 256 abonnés par port OLT en GPON) et sa facilité de maintenance. En contrepartie, la bande passante est partagée entre les abonnés, ce qui nécessite des mécanismes d'allocation dynamique de bande passante (DBA — Dynamic Bandwidth Allocation) pour garantir la qualité de service. [9][13]

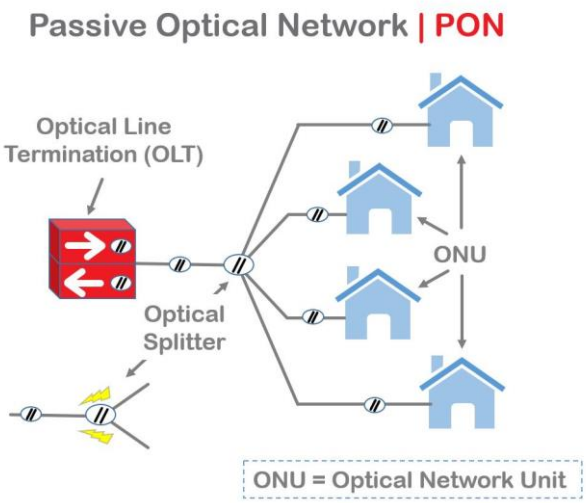


Figure 1.8 : Architecture point à multipoint — réseau PON [9][13]

1.3.3 Réseau maillé (Mesh Network)

Dans un réseau maillé, chaque nœud peut être connecté à plusieurs autres nœuds, créant ainsi une topologie fortement redondante où il existe plusieurs chemins possibles entre chaque paire de source et de destination. Comme le montre la figure 1.9. Cette architecture est caractéristique des réseaux de transport optiques à longue distance (backbone) et des réseaux métropolitains à haute disponibilité.

On distingue deux variantes principales :

- Réseau maillé complet (full mesh) : chaque nœud est directement connecté à tous les autres nœuds. Pour N nœuds, le nombre de liens nécessaires est N(N-1) /2. Cette configuration offre la résilience maximale mais son coût devient prohibitif au-delà d'une dizaine de nœuds.
- Réseau maillé partiel (partial mesh) : chaque nœud est connecté à un sous-ensemble d'autres nœuds, offrant un compromis entre redondance et coût d'infrastructure. C'est l'architecture privilégiée dans les réseaux WDM longue distance réels.

La gestion d'un réseau maillé fait appel à des algorithmes de routage et de protection (RSVP-TE, OSPF-TE) et à des équipements de commutation optique tels que les ROADM (Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer) et les OXC (Optical Cross-Connects), qui permettent de reconfigurer dynamiquement les chemins optiques (lightpaths) sans conversion électronique.

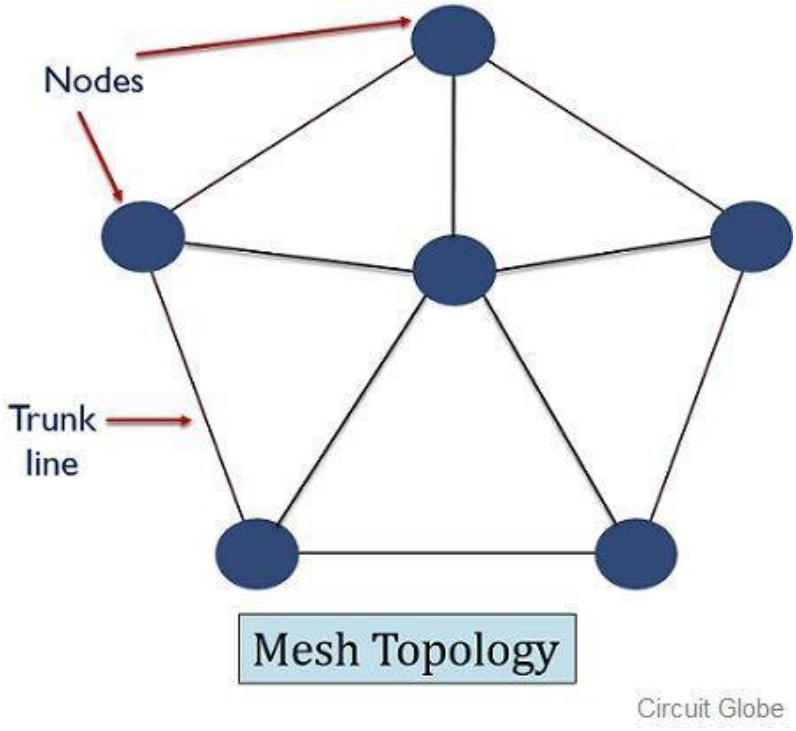


Figure 1.9 : Réseau maillé full mesh et partial mesh [13][17]

1.3.4 Réseau étoile (Star Network)

Dans un réseau étoile, tous les nœuds périphériques sont connectés à un nœud central (hub ou concentrateur), mais ne disposent d'aucune connexion directe entre eux (voir Figure 1.10). Toute communication entre deux nœuds périphériques doit transiter par le nœud central, qui assure la commutation ou le brassage du signal.

Cette topologie est particulièrement adaptée aux réseaux locaux (LAN optiques), aux datacenters (architecture spine-leaf) et aux réseaux de distribution optique centralises. Le nœud central peut être un simple coupleur étoile passif (star coupler) dans les systèmes broadcast, ou un équipement actif de commutation (OXC, ROADM) dans les réseaux configurables.

L'avantage principal de l'architecture étoilée est sa simplicité de gestion et de maintenance. Sa principale faiblesse est la vulnérabilité du nœud central : une défaillance de ce dernier entraîne l'interruption de toutes les communications du réseau.

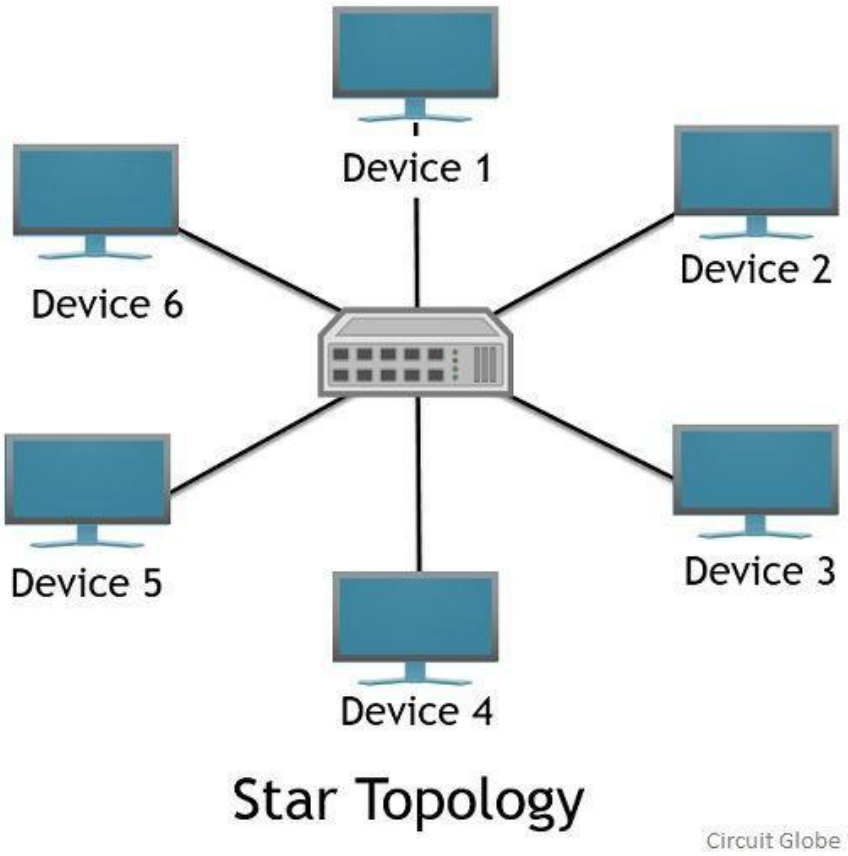


Figure 1.10 : Architecture en étoile [13]

1.3.5 Tableau comparatif des architectures

Le Tableau 1.1 synthétise et compare les quatre architectures fondamentales des réseaux optiques selon plusieurs critères déterminants : le nombre de liens nécessaires, la résilience face aux pannes, le coût d'infrastructure, la flexibilité et les applications typiques. Ce tableau constitue un outil de référence pour orienter le choix architectural en fonction des contraintes du déploiement.

Critère	Point à point	Point à multipoint	**Maille**	Étoile
Nombre de liens	1	1 vers N	N(N-1) /2 max	N
Résilience	Faible	Faible	Très élevée	Moyenne
Coût infrastructure	Faible	Faible (passif)	Élevé	Moyen
Flexibilité	Très faible	Faible	Très élevée	Moyenne
Application typique	Backbone, transocéanique	FTTx, PON, accès	WDM longue distance	LAN, datacenter

1.4 Multiplexage optique

Le multiplexage est la technique permettant de combiner plusieurs signaux indépendants sur un même support physique (une fibre optique) afin d'en optimiser l'utilisation. Dans les réseaux optiques, le multiplexage constitue la clé de voûte de l'explosion de la capacité de transmission, permettant de passer de quelques Gbit/s sur une fibre dans les années 1990 à plusieurs Tbit/s aujourd'hui. [1][13]

1.4.1 Multiplexage en longueur d'onde (WDM / DWDM)

La Figure 1.11 illustre le principe du multiplexage WDM/DWDM avec les blocs MUX et DEMUX.

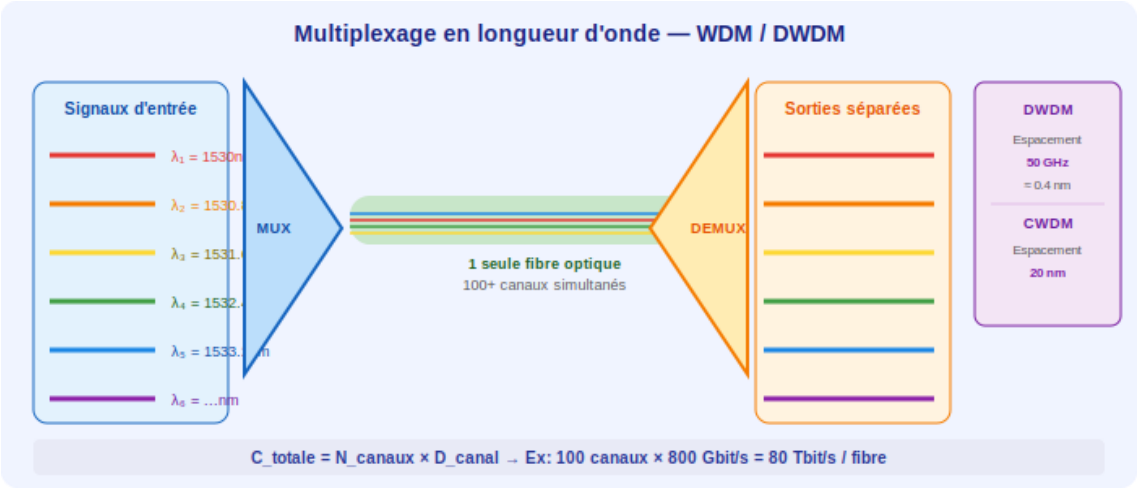


Figure 1.11 : Principe du multiplexage WDM/DWDM [2][8]

Le WDM (Wavelength Division Multiplexing) est la technique de multiplexage la plus répandue dans les réseaux optiques longue distance. Elle consiste à transmettre simultanément plusieurs canaux sur une même fibre, chaque canal étant attribué à une longueur d'onde distincte dans la bande de transmission de la fibre (typiquement la bande C : 1530-1565 nm, ou la bande L : 1565-1625 nm). On distingue deux variantes selon l'espacement entre les canaux : [2]

- CWDM (Coarse WDM) : espacement de 20 nm entre les canaux, défini par la grille ITU-T G.694.2. Permet de transporter jusqu'à 18 canaux dans la gamme 1270-1610 nm. Utilisé principalement dans les réseaux d'accès et métropolitains à courte portée, avec des lasers non refroidis (coût réduit). [8]
- DWDM (Dense WDM) : espacement de 100 GHz (~0,8 nm) ou 50 GHz (~0,4 nm) voire 25 GHz, défini par la grille ITU-T G.694.1. Permet de transporter plusieurs

dizaines à plusieurs centaines de canaux dans la bande C. Utilisé dans les réseaux de transport longue distance. [8]

La capacité totale d'un système DWDM est donnée par la relation : [8]

$$C_totale = N_canaux \times D_canal \quad (1.5)$$

Où N_canaux est le nombre de longueurs d'onde et D_canal le débit par canal. Les systèmes commerciaux actuels atteignent des capacités de 800 Gbit/s par canal (modulation DP-64QAM) sur plus de 100 canaux, soit des capacités totales dépassant 80 Tbit/s sur une seule paire de fibres. [8]

1.4.2 Multiplexage temporel (TDM / OTDM)

Le multiplexage temporel (TDM — Time Division Multiplexing) consiste à allouer des intervalles de temps distincts (time slots) à chaque flux de données, qui partagent ainsi la même bande passante optique de façon séquentielle. Dans le domaine optique, l'OTDM (Optical TDM) permet d'atteindre des débits de plusieurs centaines de Gbit/s par canal en combinant des impulsions ultra-courtes issues de différentes sources synchronisées. [1][2]

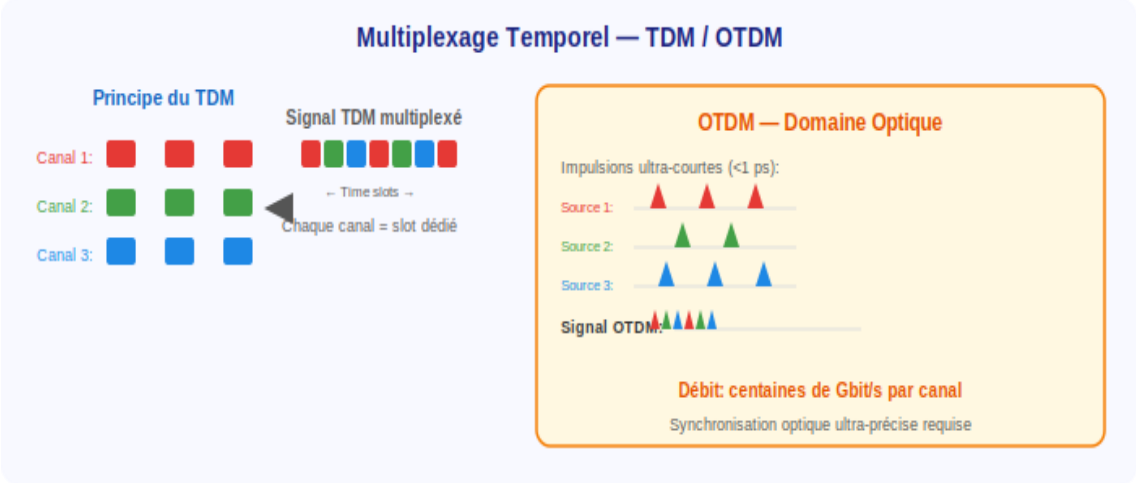


Figure 1.12 : Multiplexage TDM et OTDM [1][2]

1.4.3 Multiplexage par polarisation (PolMux / PDM).

Le multiplexage par polarisation (PolMux ou PDM — Polarization Division Multiplexing) exploite les deux états de polarisation orthogonaux d'une fibre monomode pour transporter deux flux de données indépendants sur la même longueur d'onde. Cette technique permet de doubler l'efficacité spectrale (bits/s/Hz) sans élargir la bande passante occupée. [12][16]

Couplé à une modulation à plusieurs niveaux (QPSK, 16-QAM, 64-QAM) et à la détection cohérente, le PolMux a permis d'atteindre des efficacités spectrales de 4 à 12 bit/s/Hz dans les systèmes commerciaux actuels. La séparation des deux polarisations en réception est réalisée par un PBS (Polarization Beam Splitter) suivi d'un traitement numérique (DSP) avec un égaliseur adaptatif. [12]

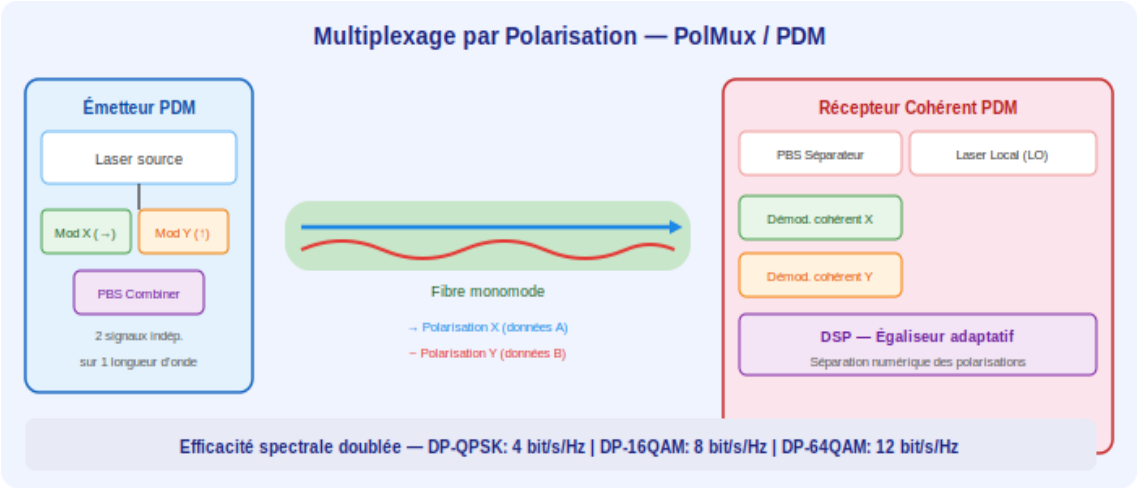


Figure 1.13 : Multiplexage par polarisation PDM/PolMux [12][16]

1.4.4 Multiplexage spatial (SDM)

Le multiplexage spatial (SDM — Space Division Multiplexing) est une technique émergente qui exploite la dimension spatiale de la fibre pour augmenter la capacité de transmission. Il se décline en plusieurs approches : les fibres multicœurs (MCF — Multi-Core Fiber), les fibres multimodes (FMF — Few-Mode Fiber) et les câbles à fibres multiples. Les systèmes SDM expérimentaux ont démontré des capacités dépassant le Pbit/s en combinant SDM, WDM et PDM. [2]

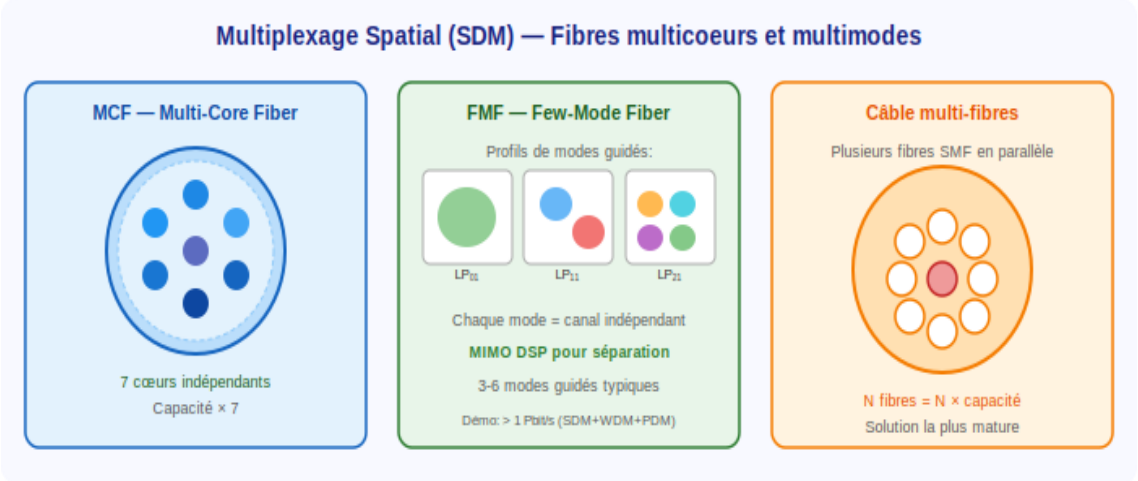


Figure 1.14 : Variantes du multiplexage spatial SDM [2]

1.5 Routage optique

Le routage optique désigne l'ensemble des mécanismes permettant d'acheminer un signal optique d'un nœud source vers un nœud destination à travers un réseau, en sélectionnant le chemin optique (lightpath) approprié parmi les routes disponibles. Contrairement au routage électronique classique (commutation par paquets), le routage optique vise à maintenir le signal dans le domaine optique tout au long de son trajet, évitant ainsi les conversions optoélectroniques coûteuses en énergie et en latence.

1.5.1 Commutation de circuits optiques (OCS)

La commutation de circuits optiques (OCS — Optical Circuit Switching) établit un chemin optique dédié et continu entre la source et la destination pour toute la durée de la communication. Les équipements clés du routage optique par commutation de circuits sont : [13][17]

- OADM (Optical Add-Drop Multiplexer) : permet d'extraire (drop) ou d'insérer (add) une ou plusieurs longueurs d'onde spécifiques d'un signal WDM en transit, sans démultiplexer l'ensemble du signal.
- ROADM (Reconfigurable OADM) : version reconfigurable de l'OADM, pilotable à distance via des plans de contrôle logiciels (GMPLS, OpenConfig). Basé sur des éléments WSS (Wavelength Selective Switch), il offre une flexibilité totale dans l'assignation des longueurs d'onde sans intervention physique.
- OXC (Optical Cross-Connect) : commutateur optique à grande échelle permettant le brassage des liaisons WDM entre plusieurs fibres entrantes et sortantes. Il peut être de type opaque (avec conversion O-E-O), transparent (tout-optique) ou translucide (conversion sélective). [7][17]

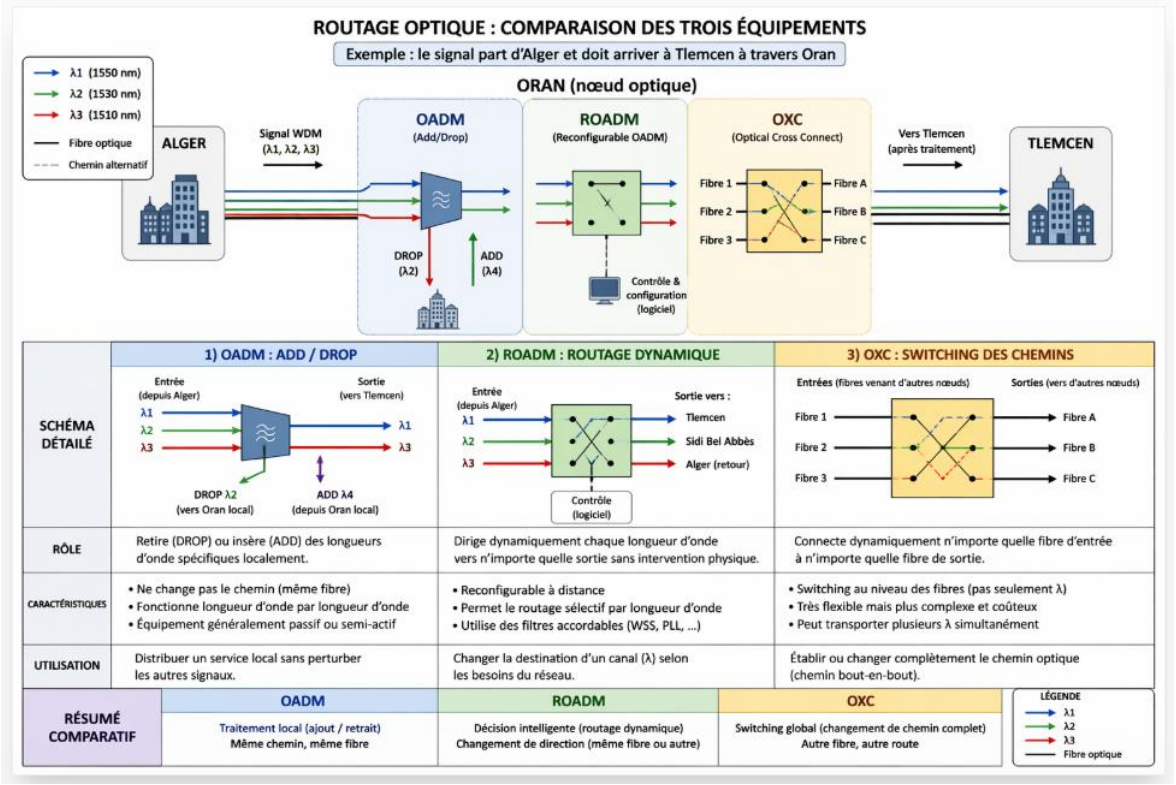


Figure 1.15 : Comparaison des équipements de routage optique (OADM, ROADM et OXC)

1.5.2 Routage et assignation de longueurs d'onde (RWA).

Le problème du routage et de l'assignation de longueurs d'onde (RWA — Routing and Wavelength Assignment) est un problème d'optimisation combinatoire central dans la conception des réseaux WDM. Il consiste à déterminer simultanément :

- Le chemin physique (route) emprunté par chaque connexion dans le réseau.
- La longueur d'onde (ou l'ensemble de longueurs d'onde) assignée à chaque lien du chemin. [17]

La contrainte de continuité de longueur d'onde (Wavelength continuity constraint) impose que, dans un réseau sans conversion de longueur d'onde, le même canal soit utilisé sur tous les liens du chemin optique. Les algorithmes de RWA incluent des approches exactes (programmation linéaire entière), des heuristiques (first-fit, least-used, most-used) et des méthodes métaheuristiques (algorithmes génétiques, recuit simulé) pour les réseaux de grande taille.

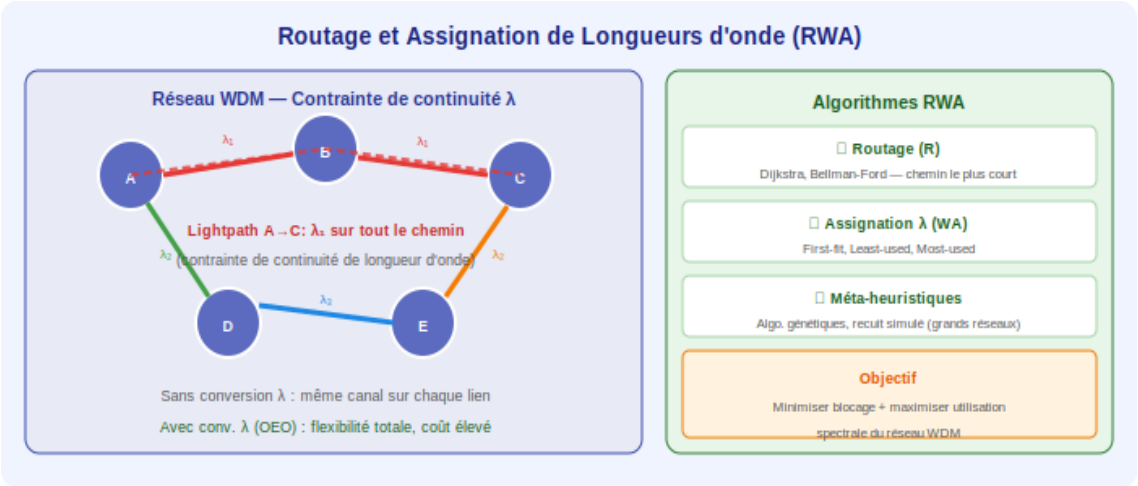


Figure 1.16 : RWA — Routing and Wavelength Assignment [17]

1.5.3 Réseaux optiques élastiques (EON)

Les réseaux optiques élastiques (EON — Elastic Optical Networks) représentent l'évolution la plus récente du routage optique. Basés sur la technologie OFDM optique ou sur la commutation de spectre flexible (Flex-grid, ITU-T G.694.1 amendée), ils permettent d'allouer à chaque connexion exactement la portion de spectre dont elle a besoin, avec une granularité de 12,5 GHz. Le problème de routage et d'assignation de spectre (RSA — Routing and Spectrum Assignment) remplace le RWA dans ce contexte.

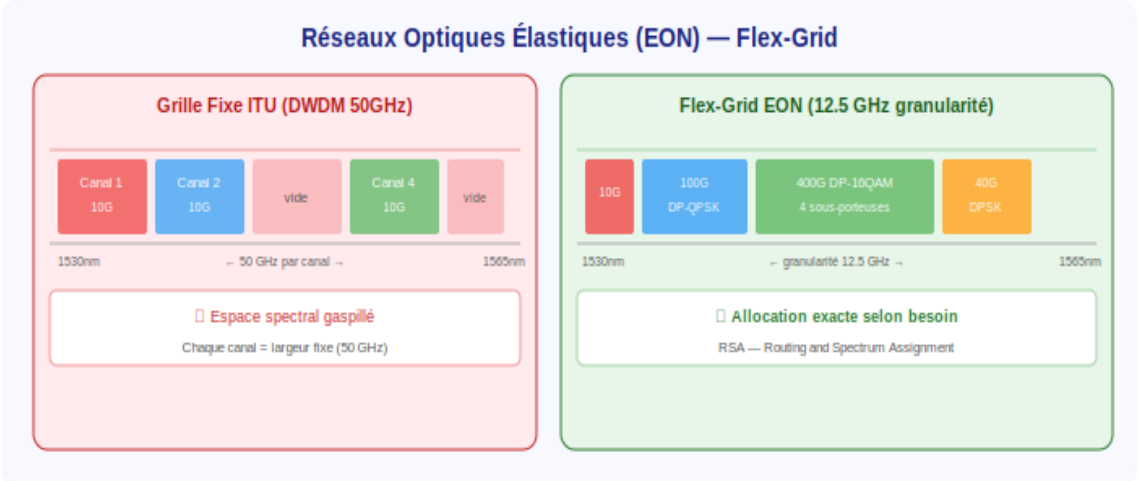


Figure 1.17 : Réseaux EON et Flex-Grid [4][6]

1.6 Filtrage optique

Le filtrage optique est une fonction essentielle dans les réseaux WDM : il permet de sélectionner, d'isoler ou d'éliminer des longueurs d'onde spécifiques au sein d'un signal multiplex, sans recourir à une conversion vers le domaine électrique. La qualité d'un filtre

optique est caractérisée par sa sélectivité spectrale, ses pertes d'insertion, son taux de réjection hors-bande et sa stabilité en température. [1][11]

1.6.1 Filtres à réseau de Bragg en fibre (FBG)

Le réseau de Bragg en fibre (FBG — Fiber Bragg Grating) est un filtre réflectif créé par une modulation périodique de l'indice de réfraction du cœur d'une fibre, obtenue par exposition à un rayonnement UV intense. Il réfléchit sélectivement la longueur d'onde de Bragg définie par la relation : [11]

$$\lambda_B = 2n_eff\Lambda \tag{1.6}$$

Où n_eff est l'indice effectif du mode guidé et Λ la période de la modulation d'indice. La bande passante typique d'un FBG standard est de l'ordre de 0,1 à 1 nm, avec un taux de réjection pouvant dépasser 40 dB (voir la figure 1.18). Les FBG sont utilisés comme filtres de démultiplexage, comme compensateurs de dispersion chromatique (chirped FBG) et comme éléments senseurs dans les systèmes de surveillance distribuée. [11]

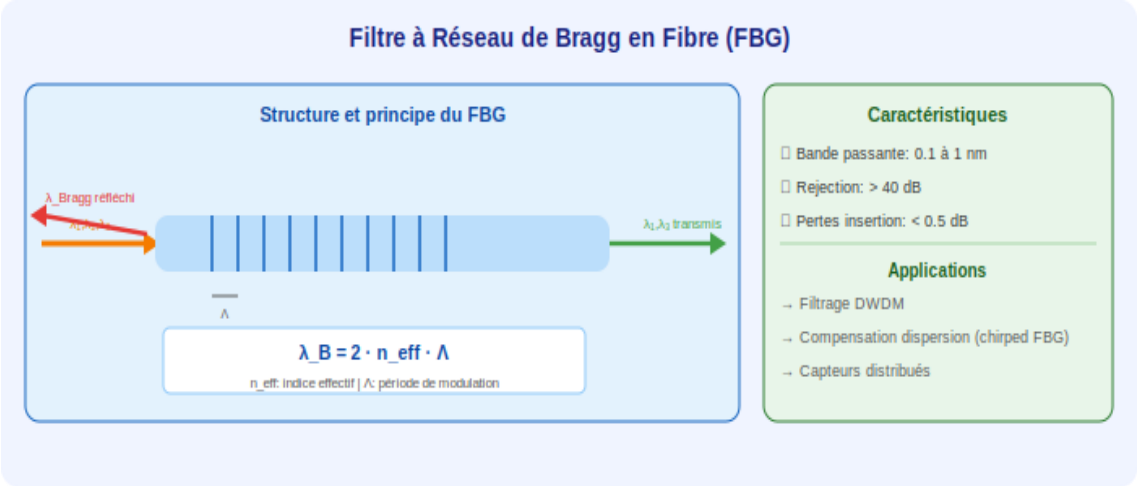


Figure 1.18 : Filtre à réseau de Bragg FBG [11]

1.6.2 Filtres interférométriques (Fabry-Perot, Mach-Zehnder)

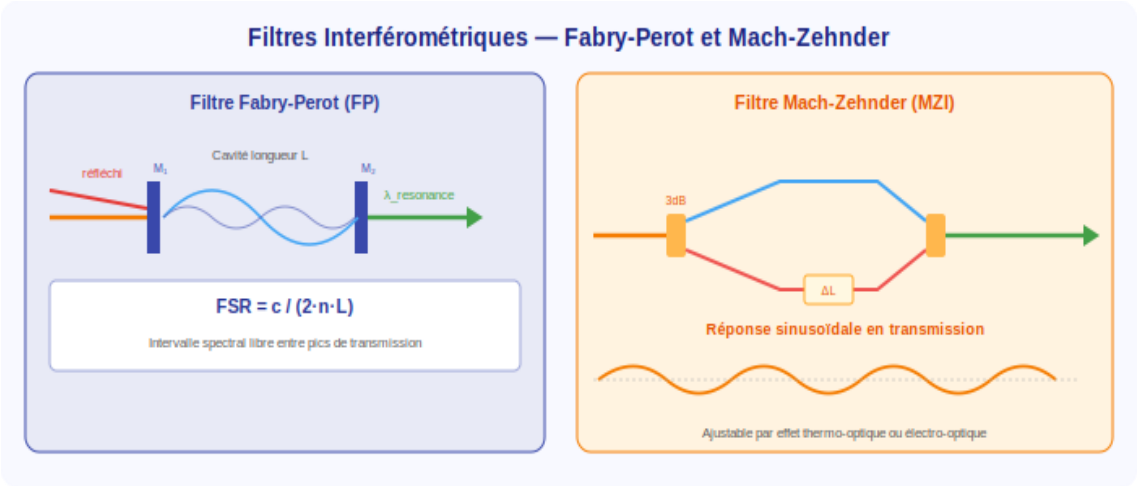


Figure 1.19 : Filtres Fabry-Perot et Mach-Zehnder [11][14]

Les filtres de Fabry-Perot (FP) exploitent le phénomène de résonance par interférences multiples entre deux miroirs partiellement réfléchissants. Leur réponse spectrale est une succession de pics de transmission (modes longitudinaux) séparés par l'intervalle spectral libre (FSR — Free Spectral Range) : [11][14]

$$FSR = c / (2nL) \tag{1.7}$$

Où c représente la vitesse de la lumière, n l'indice de réfraction du milieu et L la longueur de la cavité. Les filtres Mach-Zehnder à fibres ou intégrés sur silicium constituent un autre type de filtre interférométrique à deux bras, dont la réponse sinusoïdale peut être modifiée par action thermo-optique ou électro-optique sur l'un des bras.

1.6.3 Démultiplexeurs AWG (Arrayed Waveguide Grating)

L'AWG (Arrayed Waveguide Grating) est le composant de démultiplexage le plus utilisé dans les systèmes DWDM intégrés. Il repose sur le principe de l'interférence entre un réseau de guides d'ondes de longueurs différentes (réseau d'ondes guidées) pour diriger chaque longueur d'onde vers un port de sortie diffèrent. Ses caractéristiques le rendent incontournable : faibles pertes d'insertion (2-4 dB typiques), bonne uniformité entre canaux, fabrication sur wafer silicium (SOI) compatible avec la photonique sur silicium, et possibilité d'intégrer des centaines de canaux. [1][8]

La Figure 1.20 présente l'architecture du démultiplexeur AWG (Arrayed Waveguide Grating).

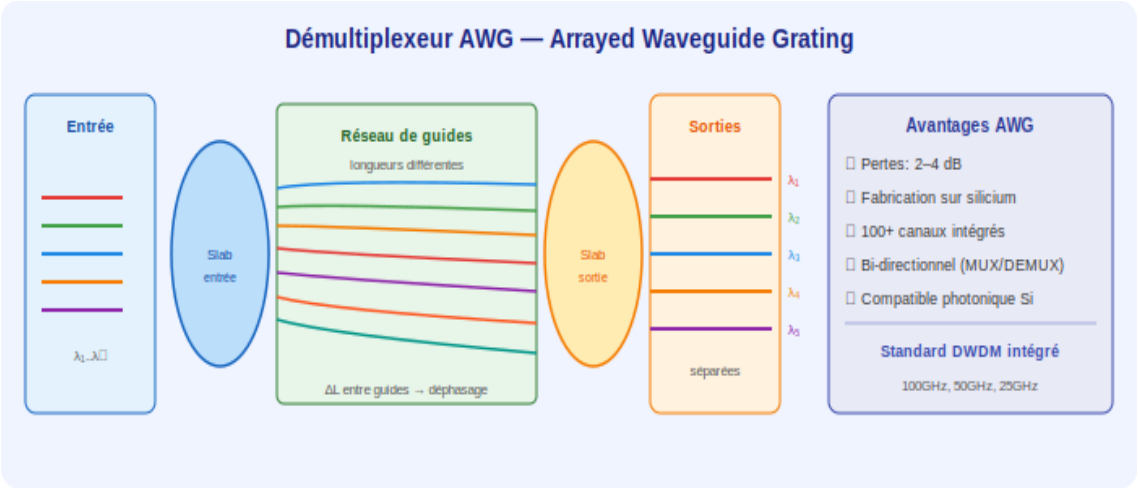


Figure 1.20 : Architecture du démultiplexeur AWG [1][8]

1.6.4 Filtres accordables (tunable filters)

Les filtres accordables permettent de sélectionner dynamiquement une longueur d'onde dans une plage spectrale définie, en ajustant un paramètre physique (tension électrique, température, angle mécanique). Les technologies incluent les filtres à cristaux liquides (LCOS — Liquid Crystal on Silicon), les filtres MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) et les filtres thermo-optiques sur silicium. Comme le montre la figure 1.21.

Ces filtres sont au cœur des WSS (Wavelength Selective Switch) qui équipent les ROADM modernes. [4][17]

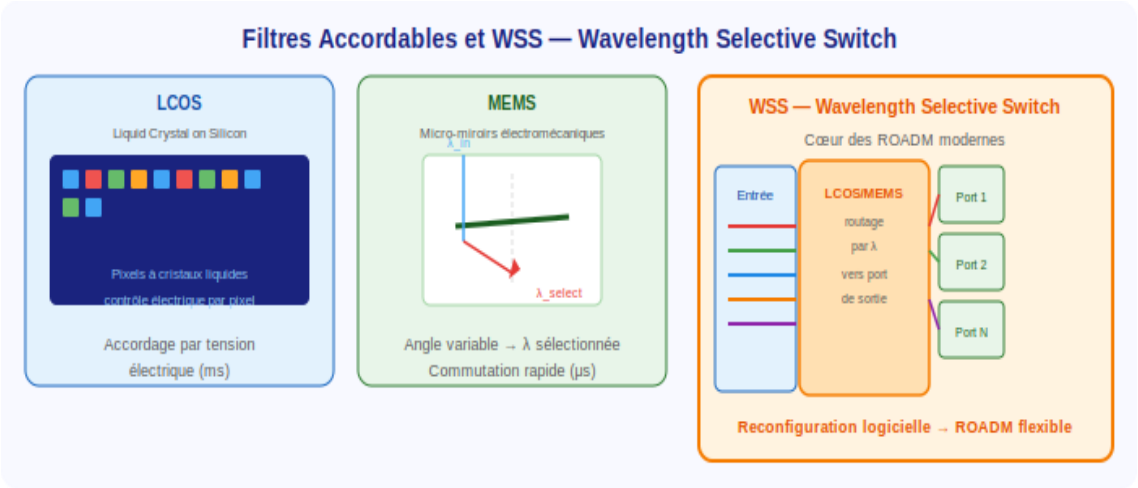


Figure 1.21 : Filtres accordables LCOS, MEMS et WSS [4][17]

1.7 Modulation optique

La modulation optique est le processus par lequel l'information numérique ou analogique est encodée sur le signal lumineux porteur avant sa transmission dans la fibre optique. Le choix du format de modulation détermine directement l'efficacité spectrale du système, sa robustesse aux dégradations (bruit, dispersion, effets non linéaires) et sa complexité d'implémentation. L'évolution des formats de modulation optique suit de près la progression des débits transmis et des capacités de traitement numérique du signal. [12][16]

1.7.1 Modulation d'intensité — détection directe (IM-DD)

La modulation d'intensité avec détection directe (IM-DD — Intensity Modulation — Direct Detection) est le format historique et le plus simple : l'intensité optique est modulée entre deux niveaux (niveau haut = bit 1, niveau bas = bit 0), ce qui constitue le format OOK (On-Off Keying) ou NRZ (Non-Return-to-Zero). Le récepteur utilise une photodiode qui convertit directement l'intensité optique en courant électrique. Ce format est insensible à la phase et à la polarisation du signal, ce qui simplifie considérablement l'implémentation du récepteur.

Les variantes NRZ-OOK, RZ-OOK (Return-to-Zero) et PAM4 (Pulse Amplitude Modulation à 4 niveaux, 2 bits/symbole) sont encore largement utilisées dans les réseaux d'accès, les LAN optiques et les connexions intra-datacenter à courte portée (jusqu'à 400G par canal en PAM4). [5][16]

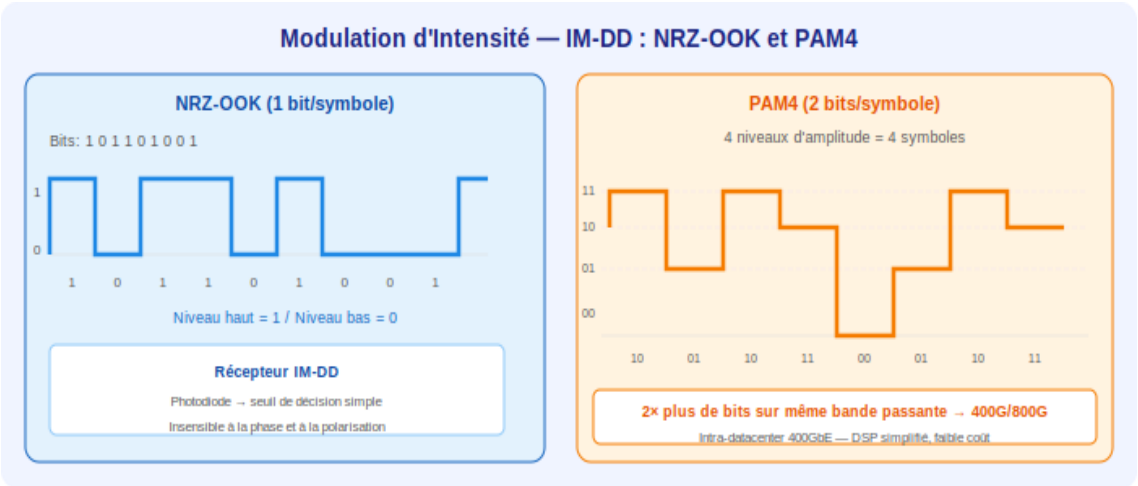


Figure 1.22 : Formats NRZ-OOK et PAM4 [5][16]

1.7.2 Modulation de phase (BPSK, QPSK, DPSK)

Les formats de modulation de phase encodent l'information dans la phase de l'onde optique porteuse. Le BPSK (Binary Phase-Shift Keying) utilise deux états de phase (0 et pi),

le DPSK (Differential PSK) encode l'information dans les transitions de phase plutôt que dans les valeurs absolues, et le QPSK (Quadrature PSK) utilise quatre états de phase (0, pi/2, pi, 3pi/2) pour transporter 2 bits par symbole. [12][16]

Ces formats offrent une meilleure robustesse au bruit par rapport à l'OOK (gain de 3 à 6 dB sur la sensibilité du récepteur) et une efficacité spectrale supérieure. Ils nécessitent cependant un modulateur à deux bras (MZM — Mach-Zehnder Modulator) pour contrôler indépendamment l'amplitude et la phase du signal. [12]

La Figure 1.23 illustre les constellations de modulation de phase BPSK, DPSK et QPSK.

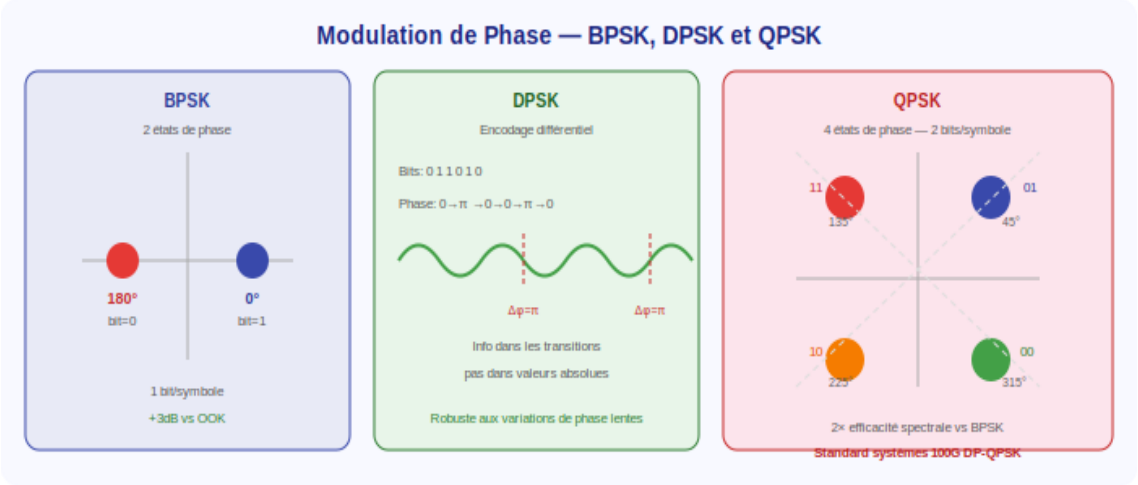


Figure 1.23 : Constellations BPSK, DPSK et QPSK [12][16]

1.7.3 Modulation cohérente et formats avancés (DP-QPSK, DP-nQAM)

La détection cohérente, combinée aux formats de modulation avancés, constitue le paradigme dominant des systèmes de transmission à très haut débit (100G et au-delà). Dans ce schéma, le signal est démodulé par battement avec un oscillateur local (laser LO — Local Oscillator), permettant de récupérer simultanément les quatre composantes du champ optique : deux quadratures (I et Q) sur chacune des deux polarisations (X et Y). [12][16]

Le format DP-QPSK (Dual-Polarization QPSK) transporte 4 bits/symbole (2 bits par polarisation x 2 polarisations) et est standardisé pour les systèmes 100G. Les formats DP-16QAM (8 bits/symbole) et DP-64QAM (12 bits/symbole) permettent d'atteindre respectivement 400G et 800G par canal. (Voir la figure 1.24). L'efficacité spectrale SE des formats cohérents est donnée par : [12][16]

$$SE = N_pol \cdot \log_2(M) \cdot r_FEC \qquad (1.8)$$

Où M est l'ordre de la constellation QAM, N_pol le nombre de polarisations utilisées (1 ou 2) et r_FEC le taux de redondance introduit par le code correcteur d'erreurs (FEC — Forward Error Correction). [16]

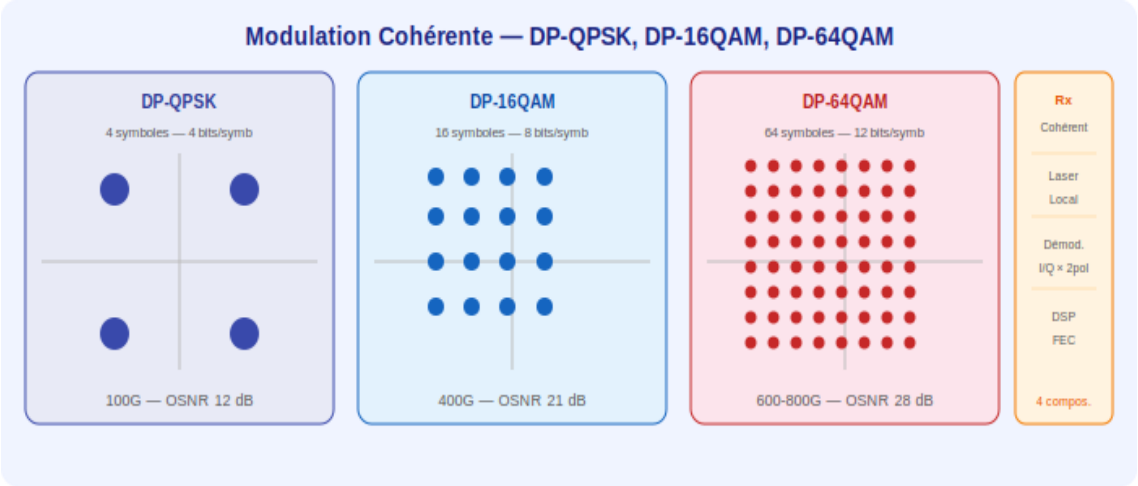


Figure 1.24 : DP-QPSK, DP-16QAM et DP-64QAM [12][16]

1.7.4 Modulateurs optiques

Les modulateurs optiques sont les composants actifs qui impriment le format de modulation sur le signal lumineux. Les principales technologies utilisées dans les systèmes haute performance sont : [1][16]

- Modulateur Mach-Zehnder (MZM) à $LiNbO_3$: exploite l'effet électro-optique pour moduler la phase dans chacun des deux bras d'un interféromètre. Largeur de bande jusqu'à 40 GHz, faible chirp. Standard de l'industrie pour les systèmes cohérents. [1][12]
- Modulateur IQ (In-phase/Quadrature) : assemblage de deux MZM imbriqués avec un déphaseur de $\pi/2$, permettant de moduler indépendamment les composantes I et Q du champ optique. Indispensable pour les formats QAM d'ordre élevé. [12][16]
- Modulateur à électro-absorption (EAM) : exploite la variation de l'absorption d'un semi-conducteur sous l'effet d'un champ électrique. Compact, intégrable sur InP, mais introduit un chirp plus important que le MZM.

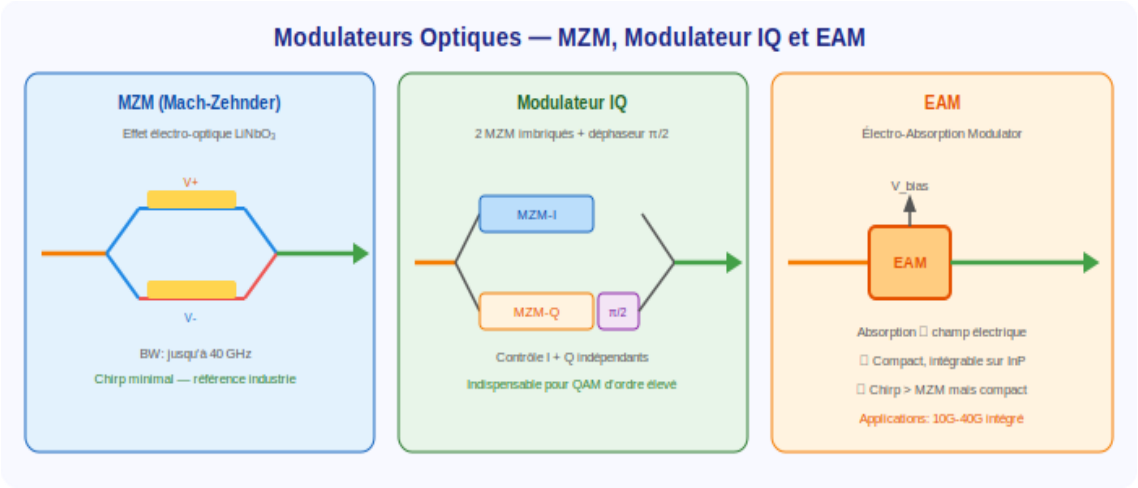


Figure 1.25 : Modulateurs optiques MZM, IQ et EAM [1][12]

1.7.5 Tableau comparatif des formats de modulation

Le tableau 1.7 met en évidence la hiérarchie des formats de modulation selon leur efficacité spectrale et leurs contraintes en termes d'OSNR. Le NRZ-OOK, format d'intensité simple à 1 bit/symbole, offre une robustesse aux non-linéarités mais une efficacité spectrale limitée à 10 Gbit/s, adapté aux accès courte portée et LAN. Le PAM4, codant 2 bits/symbole sur quatre niveaux d'amplitude, permet d'atteindre 100–400 Gbit/s avec un OSNR requis de ~18 dB, trouvant son application dans les interconnexions de datacenters à haute densité (400GbE). Les formats cohérents à polarisation duale (DP) exploitent les deux états de polarisation orthogonaux du champ électrique, doublant ainsi l'efficacité spectrale : le DP-QPSK à 4 bits/symbole constitue le standard des liaisons backbone 100G grâce à sa tolérance à la dispersion chromatique et à la PMD, avec un OSNR de seulement ~12 dB. Le DP-16QAM et le DP-64QAM, codant respectivement 8 et 12 bits/symbole via une modulation d'amplitude et de phase en quadrature, permettent des débits de 400 Gbit/s à 600–800 Gbit/s, au prix d'une sensibilité accrue aux fluctuations d'OSNR (~21 dB et ~28 dB) et d'une complexité DSP élevée pour la compensation des impairement linéaires et non-linéaires. Le choix du format est ainsi dicté par le compromis entre capacité spectrale, budget optique disponible et complexité de traitement en réception cohérente.

Format	Bits/symbole	**Débit typique**	**OSNR requis (dB)**	**Application**
NRZ-OOK	1	10 Gbit/s	~12	Accès, LAN
PAM4	2	100-400 Gbit/s	~18	Datacenter, 400GbE
DP-QPSK	4	100 Gbit/s	~12	Backbone 100G
DP-16QAM	8	400 Gbit/s	~21	Transport 400G
DP-64QAM	12	600-800 Gbit/s	~28	Ultra-capacité

1.8 Conclusion

Ce chapitre a présenté les fondements des réseaux optiques modernes à travers trois axes complémentaires : les bases physiques de la fibre optique et de la chaîne de transmission, les architectures topologiques des réseaux, et les fonctions optiques essentielles. [1][13]

Du point de vue des architectures, les quatre topologies fondamentales répondent à des besoins différents en termes de capacité, de résilience et de coût. Les réseaux réels combinent souvent plusieurs de ces topologies : un backbone WDM maillé alimentant des réseaux d'accès PON en architecture point à multipoint, avec des nœuds étoilés au niveau des datacenters. [13]

Du point de vue des fonctions, le multiplexage WDM/DWDM constitue le levier principal de l'augmentation de la capacité. Le routage optique, rendu flexible par les ROADM et les OXC, permet une gestion dynamique des chemins lumineux dans des réseaux reconfigurables. Le filtrage optique assure la sélection spectrale fine nécessaire aux opérations de multiplexage et de démultiplexage. Enfin, les formats de modulation avancés — DP-QPSK, DP-16QAM, DP-64QAM — combinés à la détection cohérente et au traitement numérique du signal, repoussent continuellement les limites de l'efficacité spectrale. [2][8]

Chapitre 2

Généralités sur la polarisation de la lumière

2.1. Introduction

La polarisation est une propriété fondamentale de la lumière qui décrit l'orientation du vecteur champ électrique au cours de sa propagation. Contrairement à d'autres propriétés telles que l'intensité ou la fréquence, la polarisation traduit le caractère vectoriel de l'onde électromagnétique et constitue un degré de liberté supplémentaire exploitable dans les systèmes optiques modernes [20][29].

Historiquement, la notion de polarisation fut introduite par Étienne-Louis Malus en 1808, qui observa que la lumière réfléchie par une surface plane pouvait être partiellement ou totalement polarisée. Augustin-Jean Fresnel établit par la suite les bases théoriques de ce phénomène en développant la théorie ondulatoire de la lumière. Plus tard, George Gabriel Stokes proposa en 1852 une description mathématique rigoureuse de l'état de polarisation à travers ses fameux paramètres, permettant de traiter aussi bien la lumière totalement polarisée que partiellement polarisée ou non polarisée [30].

Dans le domaine des télécommunications optiques, la polarisation joue un rôle déterminant dans les systèmes de transmission cohérente, les capteurs à fibre optique, les systèmes LIDAR, ainsi que dans les composants actifs et passifs tels que les modulateurs, les amplificateurs et les coupleurs. La maîtrise de la polarisation permet d'optimiser les performances des liaisons optiques, de réduire les effets néfastes tels que la dispersion des modes de polarisation (PMD), et d'exploiter le multiplexage par polarisation (PolMux) pour doubler la capacité de transmission [18].

Ce chapitre présente de manière progressive les différents états de polarisation de la lumière, les outils mathématiques permettant leur description et leur transformation, puis les composants fibres permettant leur gestion dans un système optique.

2.2. États de polarisation de la lumière

Une onde électromagnétique se propageant dans la direction z peut être décrite par ses composantes du champ électrique dans le plan transverse (x, y). L'état de polarisation est entièrement défini par l'évolution temporelle et spatiale de ces deux composantes [20][23] :

$$E_x(z,t) = E_{0x} \cdot \cos(\omega t - kz + \varphi_x) \quad (2.1)$$

$$E_y(z,t) = E_{0\gamma} \cdot \cos(\omega t - kz + \varphi_\gamma) \quad (2.2)$$

Où E_{0x} et $E_{0\gamma}$ sont les amplitudes, ω la pulsation angulaire, k le vecteur d'onde et φ_x, φ_γ les phases initiales respectives. La combinaison de ces deux composantes détermine la nature de la polarisation [21].

2.2.1. Polarisation linéaire

La polarisation linéaire est obtenue lorsque les deux composantes du champ électrique oscillent en phase ($\Delta\varphi = \varphi_x - \varphi_\gamma = 0$ ou π). Dans ce cas, le vecteur champ électrique décrit une trajectoire rectiligne dans le plan transverse [22].

a) Polarisation horizontale

Lorsque $E_{o\gamma} = 0$, le champ électrique oscille exclusivement selon l'axe horizontal (axe x). Ce cas correspond à une polarisation purement horizontale, notée $|H\rangle$, et son vecteur de Jones s'écrit [19] :

$$|H\rangle = [1, 0]^T \tag{2.3}$$

b) Polarisation verticale

Lorsque $E_{ox} = 0$, le champ électrique oscille exclusivement selon l'axe vertical (axe y). Ce cas correspond à une polarisation purement verticale, notée $|V\rangle$ [19] :

$$|V\rangle = [0, 1]^T \tag{2.4}$$

c) Polarisation inclinée

Dans le cas général où les deux amplitudes sont non nulles et la différence de phase est nulle ou π, le champ électrique oscille selon une direction inclinée d'un angle θ par rapport à l'axe horizontal. Le vecteur de Jones correspondant est [3,5] :

$$|\theta\rangle = [\cos\theta, \sin\theta]^T \tag{2.5}$$

Les cas particuliers $\theta = 45°$ et $\theta = -45°$ correspondent aux polarisations diagonales, également importantes dans les systèmes de mesure et de communication.

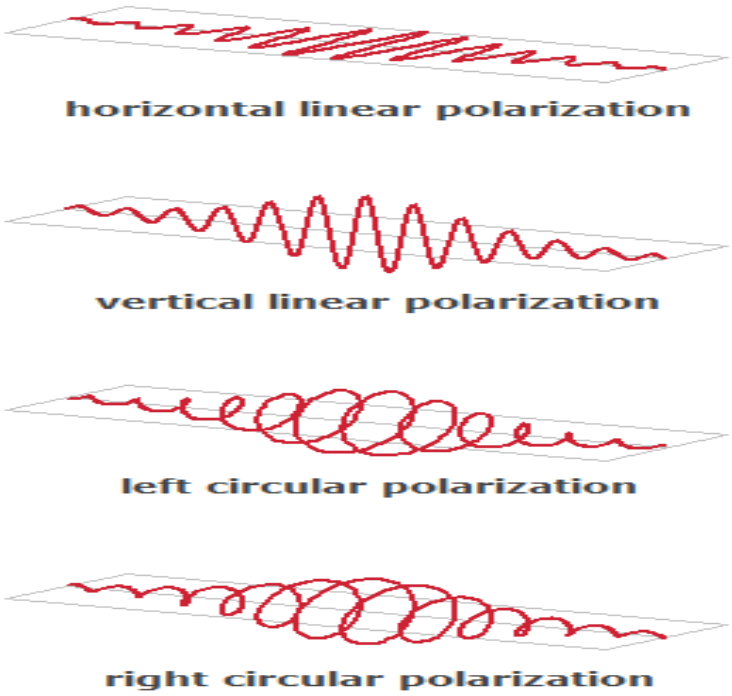


Figure 2.1 : États fondamentaux de polarisation de la lumière [21]

2.2.2. Polarisation circulaire

La polarisation circulaire est obtenue lorsque les deux composantes du champ électrique ont des amplitudes égales ($E_{0x} = E_{0\gamma} = E_0$) et un déphasage relatif de $\Delta\varphi = \pm\pi/2$ rad. Dans ce cas, l'extrémité du vecteur champ électrique décrit un cercle dans le plan transverse au cours du temps.

On distingue deux types selon le sens de rotation :

Polarisation circulaire droite (RHC) : $\Delta\varphi = -\pi/2$, le vecteur tourne dans le sens anti-horaire vu dans la direction de propagation. Son vecteur de Jones est : $(1/\sqrt{2})\ [1, -i]^T$ [20][23].

Polarisation circulaire gauche (LHC) : $\Delta\varphi = +\pi/2$, le vecteur tourne dans le sens horaire. Son vecteur de Jones est : $(1/\sqrt{2})\ [1, +i]^T$ [20][23].

La polarisation circulaire est largement utilisée dans les systèmes de télécommunications par satellite, les radars, ainsi que dans certains capteurs optiques exploitant la différence de réponse des matériaux chiraux aux deux sens de rotation [29][33].

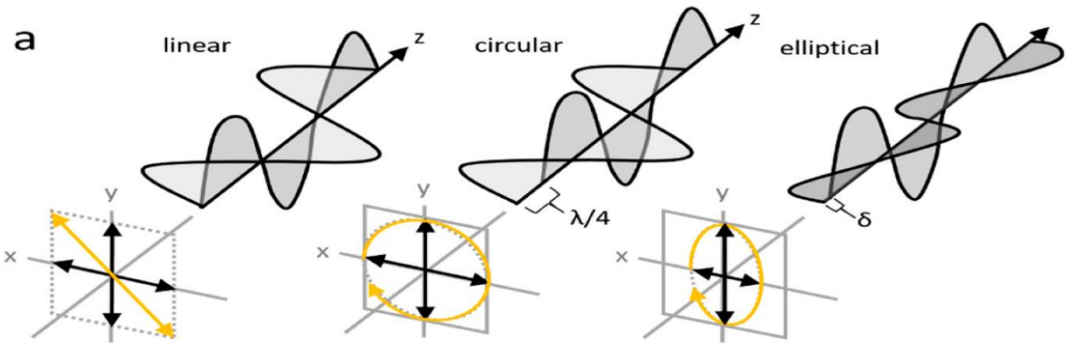
2.2.3. Polarisation elliptique

La polarisation elliptique est le cas le plus général de polarisation. Elle correspond à une situation où les amplitudes E_{0x} et $E_{0\gamma}$ sont quelconques et la différence de phase $\Delta\varphi$ est quelconque. L'extrémité du vecteur champ électrique décrit une ellipse dans le plan transverse, caractérisée par :

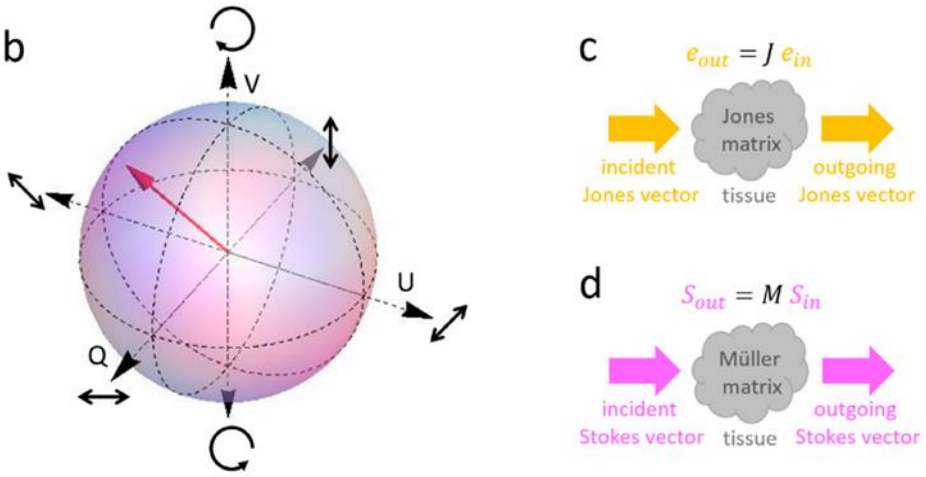
L'angle d'orientation ψ : angle entre le grand axe de l'ellipse et l'axe horizontal, compris entre 0 et π.

L'angle d'ellipticité χ : défini par $\tan \chi = b/a$, où a et b sont respectivement le grand et le petit demi-axe, avec $\chi \in [-\pi/4, +\pi/4]$.

Les polarisations linéaire ($\chi = 0$) et circulaire ($\chi = \pm\pi/4$, a = b) sont des cas particuliers de la polarisation elliptique. Tout état de polarisation peut être représenté sur la sphère de Poincaré, où les pôles correspondent aux polarisations circulaires et l'équateur aux polarisations linéaires [19][22].



a) États de polarisation de la lumière



b) Sphère de Poincaré

Figure 2.2 : Représentation des états de polarisation et de la sphère de Poincaré [19][22]

2.3. Formalisme mathématique de la polarisation

Afin de décrire et manipuler les états de polarisation de manière rigoureuse, deux formalismes mathématiques complémentaires ont été développés : le formalisme de Jones, adapté à la lumière totalement polarisée, et le formalisme de Stokes-Mueller, plus général et applicable à toute lumière, qu'elle soit totalement ou partiellement polarisée [19].

2.3.1. Vecteur de Jones

Le vecteur de Jones représente l'état de polarisation d'une onde totalement polarisée par un vecteur colonne complexe à deux composantes [20][23] :

$$E = \left[E_x, E_y\right]^T = \left[E_{0x} \cdot e^{i\varphi x}, E_{0y} \cdot e^{i\varphi y}\right]^T \quad (2.6)$$

La transformation de l'état de polarisation par un élément optique est décrite par une matrice de Jones 2×2 (notée J), telle que :

$$E_sortie = J \cdot E_entrée$$

Ce formalisme ne permet pas de traiter la lumière partiellement polarisée ni les phénomènes incohérents, ce qui constitue sa principale limitation.

2.3.2. Paramètres de Stokes

Les paramètres de Stokes, introduits par George Gabriel Stokes en 1852, permettent de décrire l'état de polarisation d'une onde lumineuse, qu'elle soit totalement polarisée, partiellement polarisée ou non polarisée. Ils forment un vecteur colonne à quatre composantes réelles, mesurables expérimentalement [30], comme le montre le Tableau 2.2.

Paramètre	Expression usuelle	Signification
S0	I_H + I_V	Intensité totale
S1	I_H - I_V	Prépondérance horizontale/verticale
S2	I (+45°) - I (-45°)	Prépondérance selon les axes inclinés
S3	I_D - I_G	Composante circulaire

Tableau 2.1 : Paramètres de Stokes et leur signification physique [22][30]

Le degré de polarisation (DOP) est défini comme suit [22] :

$$DOP = \frac{\sqrt{{S_1}^2 + {S_2}^2 + {S_3}^2}}{S_0} \in [0,1] \quad (2.7)$$

Où DOP = 1 correspond à une lumière totalement polarisée, DOP = 0 correspond à une lumière non polarisée, et 0 < DOP < 1 correspond à une lumière partiellement polarisée.

La sphère de Poincaré est une représentation géométrique tridimensionnelle de l'état de polarisation dans l'espace (S_1, S_2, S_3). Comme le montre la figure 2.3, chaque point sur la

surface de la sphère (rayon S_0) correspond à un état de polarisation totalement polarisé. Les pôles nord et sud représentent respectivement les polarisations circulaires gauche et droite, tandis que l'équateur représente toutes les polarisations linéaires.

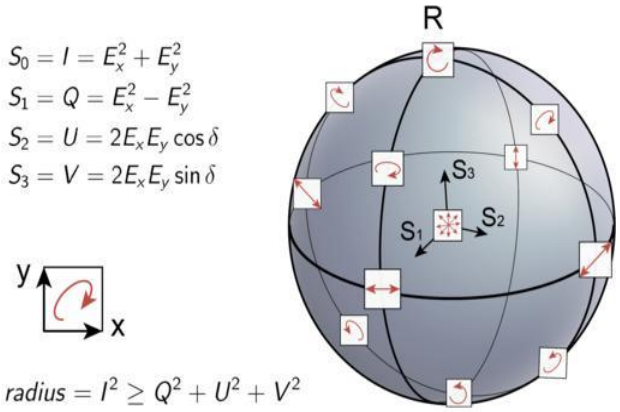


Figure 2.3. Représentation des paramètres de Stokes sur la sphère de Poincaré [14]

2.3.3. Matrice de Mueller

La matrice de Mueller est une matrice réelle 4×4 qui décrit l'effet d'un élément optique sur le vecteur de Stokes d'une onde lumineuse. La relation entrée-sortie s'écrit [19] :

$$S_sortie = M \cdot S_entrée$$

Où M est la matrice de Mueller de l'élément optique et S_entrée, S_sortie sont les vecteurs de Stokes de l'onde d'entrée et de sortie respectivement.

Les matrices de Mueller des éléments optiques courants sont les suivantes [22][31] :

Polariseur linéaire horizontal :

$$M_H = \frac{1}{2}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Lame demi-onde (axe rapide horizontal) :

$$M_{HWP} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Lame quart d'onde (axe rapide horizontal) :

$$M_{QWP} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

L'avantage majeur du formalisme de Mueller par rapport au formalisme de Jones réside dans sa capacité à traiter les effets dépolarisants et la lumière partiellement polarisée, ce qui en fait l'outil de référence pour la caractérisation expérimentale des systèmes optiques complexes (ellipsométrie de Mueller, polarimétrie d'imagerie biomédicale, etc.) [22][31].

2.4. Fibres optiques et polarisation

2.4.1. Fibres monomodes standard (SMF)

Les fibres monomodes standard (SMF pour Single-Mode Fiber) sont des fibres à saut d'indice de cœur circulaire, conçues pour ne propager qu'un seul mode spatial fondamental LP_{01} au-dessus de la longueur d'onde de coupure. En théorie, une fibre monomode parfaitement symétrique propagerait la lumière sans modifier son état de polarisation. En pratique, cependant, les imperfections géométriques du cœur (légère ellipticité), les contraintes mécaniques (torsion, courbure), et les fluctuations d'indice induisent une biréfringence aléatoire qui varie le long de la fibre et dans le temps (voir figure 2.3) [27][32]. Cette biréfringence aléatoire se manifeste par le couplage entre les deux modes de polarisation orthogonaux dégénérés (HE_{11_x} et HE_{11_γ}), provoquant une dérive imprévisible de l'état de polarisation en sortie de la fibre. Ce phénomène est à l'origine de la dispersion des modes de polarisation (PMD), qui constitue une limitation majeure dans les systèmes de transmission à très haut débit, en particulier au-delà de 10 Gbit/s [18][25].

2.4.2. Fibres à maintien de polarisation (PMF)

Les fibres à maintien de polarisation (PMF pour Polarization-Maintaining Fiber) sont des fibres monomodes spécialement conçues pour propager un état de polarisation linéaire défini le long de leur axe sans dégradation significative. Le principe repose sur l'introduction d'une biréfringence linéaire intentionnellement élevée et constante le long de la fibre, ce qui empêche le couplage de puissance entre les deux modes de polarisation orthogonaux.

La biréfringence de la PMF est caractérisée par la différence d'indices effectifs entre les deux axes principaux [26] :

$$B = |n_x - n_\gamma| \approx 10^{-4} \text{ à } 10^{-3} \quad \text{(contre } \sim 10^{-7} \text{ pour une SMF standard)}$$

On distingue plusieurs types de PMF selon la méthode d'introduction de la biréfringence :

Fibre PANDA (Polarization-maintaining ANd Absorption-reducing) : Comme le montre la figure 2.4, deux éléments de stress cylindriques en verre borosilicate sont

insérés symétriquement de part et d'autre du cœur. Les contraintes mécaniques créées induisent une biréfringence via l'effet photoélastique. Ce type est le plus répandu dans les systèmes de communication et les capteurs. Comme on peut l'observer sur la figure 2.7, plusieurs types de fibres à maintien de polarisation existent, dont la PANDA, la Bow-Tie et la fibre à cœur elliptique.

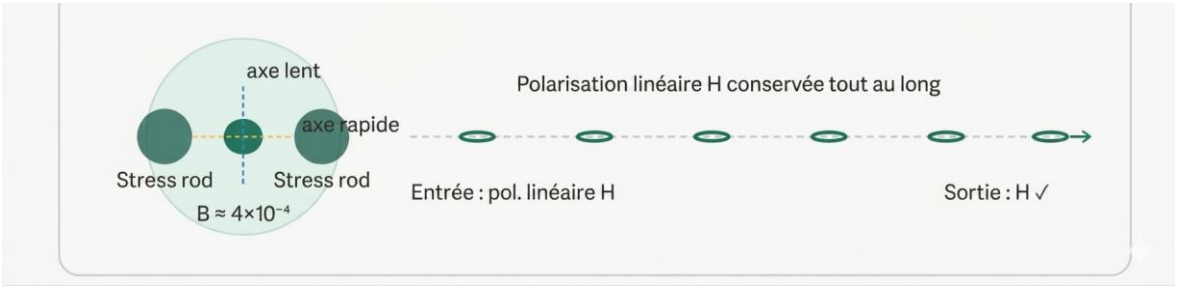
- 

Figure 2.4 : Structure d'une fibre à maintien de polarisation de type PANDA [27]

.

Fibre à cœur elliptique (Elliptical Core) : la biréfringence est obtenue par la géométrie elliptique du cœur lui-même, sans éléments de stress ajoutés (voir figure 2.5).



Figure 2.5 : Fibre à cœur elliptique pour le maintien de la polarisation [28]

La longueur de battement (beat length) caractérise la PMF et est définie par [27][28] :

$$L_B = \lambda / B \qquad (2.11)$$

Pour une PMF typique à $\lambda = 1550$ nm avec $B = 4\times10^{-4}$, on obtient $L_B \approx 3{,}9$ mm, signifiant que les deux modes reviennent en phase tous les 3,9 mm, contrairement à une SMF dont L_B peut dépasser plusieurs mètres. Comme le montre la figure 2.6, cette différence

illustre clairement l'effet de la biréfringence intentionnelle sur la longueur de battement entre les fibres SMF et PMF.

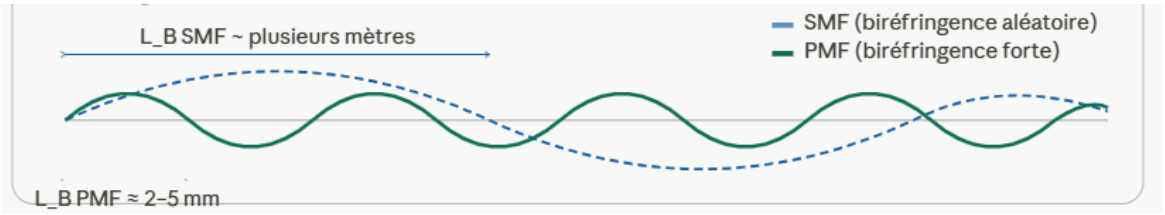


Figure 2.6 : Comparaison de la longueur de battement dans les fibres SMF et PMF [26]

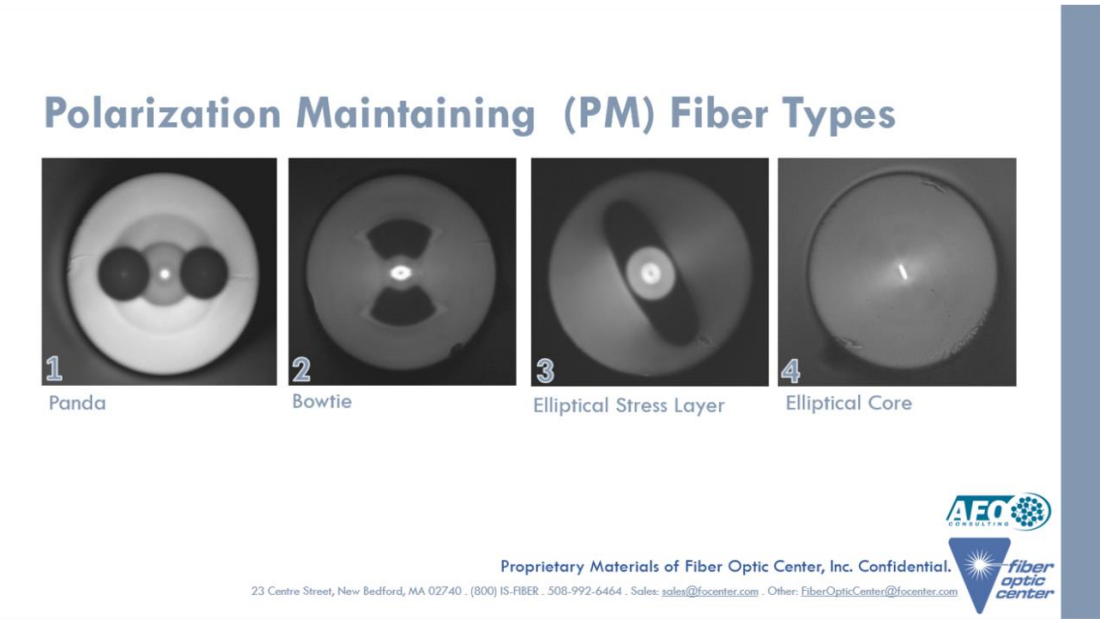


Figure 2.7 : Exemples de fibres à maintien de polarisation : PANDA, Bow-Tie et cœur elliptique [27]

❖ ***Besoin d'une fibre à maintien de polarisation (PM Fiber) :*** On utilise une fibre à maintien de polarisation lorsque l'état de polarisation du signal optique influe directement sur la qualité du signal, notamment dans les applications suivantes :

- Les systèmes de communications optiques cohérentes (modulation DP-QPSK, QAM-16) ;
- Les capteurs optiques ;
- Les interféromètres ;
- Les gyroscopes à fibre optique ;

- Les lasers et les dispositifs de modulation sensibles à la polarisation.

2.4.3 Comparaison entre SMF et PMF

Les fibres monomodes standard et les fibres à maintien de polarisation se distinguent principalement par leur comportement vis-à-vis de l'état de polarisation. Alors que la SMF est optimisée pour le transport général du signal optique à faible coût et faible atténuation, la PMF est privilégiée lorsque la stabilité de polarisation constitue une exigence fonctionnelle du système.

Critère	SMF	PMF	Avantage principal	Limite principale
État de polarisation	Peut évoluer au cours de la propagation	Mieux conservé sur les axes propres	PMF	Alignement à l'injection plus critique
Biréfringence	Faible et non contrôlée	Élevée et volontaire	PMF	Coût de fabrication plus élevé
Usage télécom standard	Très répandu	Plus spécialisé	SMF	Moins adaptée lorsque le maintien de polarisation est requis
Sensibilité aux perturbations	Plus marquée	Réduite pour le maintien de polarisation	PMF	Montage plus délicat

Tableau 2.2 : Comparaison entre les fibres SMF et PMF

2.5. Composants de gestion de la polarisation

2.5.1. Diviseurs de polarisation (PBS)

Un diviseur de polarisation (PBS pour Polarization Beam Splitter) est un composant optique qui sépare physiquement les deux composantes orthogonales de la polarisation d'un faisceau lumineux incident en deux faisceaux distincts. Il exploite la dépendance de la réflexion et de la transmission aux angles d'incidence et à la polarisation (conditions de Brewster ou interférences multicouches) [29][33].

Les caractéristiques principales d'un PBS sont :

Taux d'extinction (Extinction Ratio, ER) : rapport de la puissance du mode voulu sur la puissance du mode indésirable dans chaque port de sortie. Un bon PBS présente ER supérieur à 30 dB.

Pertes d'insertion (Insertion Loss, IL) : puissance optique perdue lors de la séparation, typiquement IL < 0,5 dB.

Largeur spectrale : bande de longueurs d'onde sur laquelle les performances restent dans les spécifications.

Il existe plusieurs technologies de PBS : les cubes PBS à couches diélectriques (séparation spatiale en espace libre), les PBS à couche mince déposée sur prismes, et les PBS entièrement à fibre utilisant un coupleur à fusion ou une structure biréfringente intégrée dans la gaine. Cette dernière catégorie présente l'avantage de faibles pertes de couplage et d'une intégration directe dans les systèmes fibres. Comme le montre la figure 2.8, le séparateur de faisceau polarisant (PBS) sépare le faisceau incident en deux composantes de polarisation orthogonales vers deux ports de sortie distincts.

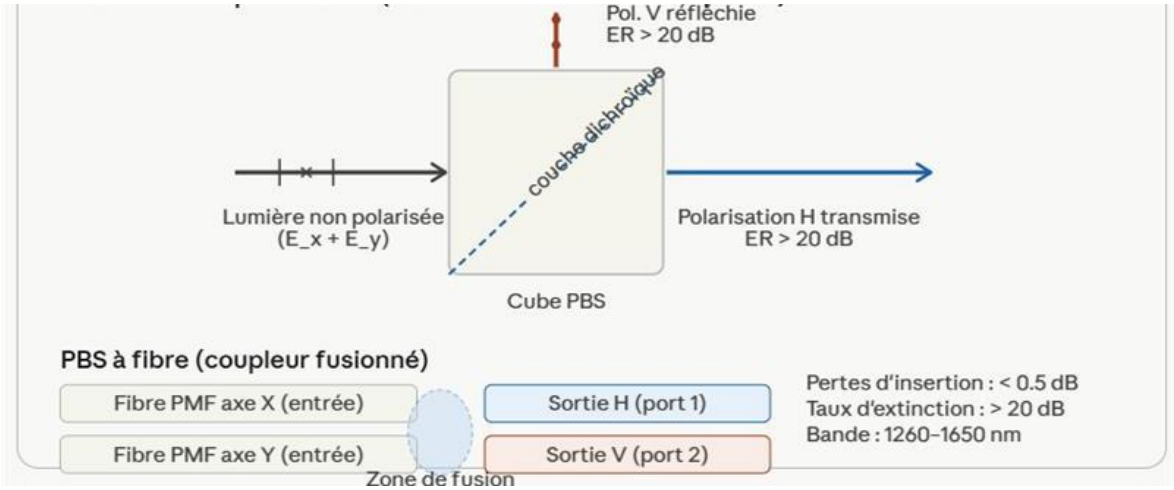


Figure 2.8 : Principe de fonctionnement d'un séparateur de faisceau polarisant (PBS) [29]

2.5.2. Combinateurs de polarisation (PBC)

Un combinateur de polarisation (PBC pour Polarization Beam Combiner) est l'opération réciproque du PBS : il combine deux faisceaux de polarisations orthogonales en un seul faisceau. Sa structure physique est identique à celle d'un PBS, mais utilisée en sens inverse.

Les PBCs sont des composants clés dans les systèmes de multiplexage par polarisation (PolMux ou PDM), où deux flux de données indépendants sont transmis simultanément sur une même fibre en utilisant les deux états de polarisation orthogonaux. Cette technique permet de doubler la capacité spectrale à bande passante constante et est devenue un standard dans les systèmes 100G, 400G et 800G à modulation cohérente (DP-QPSK, DP-16QAM) [18][33].

En réception, un PBS sépare les deux composantes de polarisation, qui sont ensuite démodulées par deux récepteurs cohérents parallèles. Le traitement numérique du signal

(DSP) à l'aide d'égaliseurs adaptatifs permet de compenser les rotations de polarisation survenues pendant la propagation. Comme le montre la figure 2.9, le combineur de faisceaux polarisants (PBC) regroupe les deux voies de polarisation orthogonales en un seul faisceau de sortie, constituant ainsi l'opération réciproque du PBS.

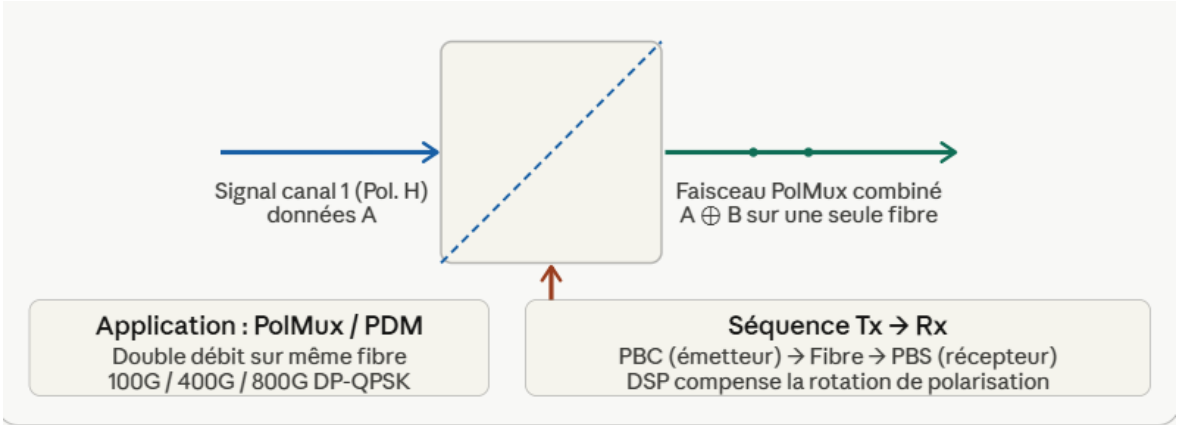


Figure 2.9 : Dispositif de mesure : injection du signal via le Bidi A vers le port 3 (port SM), mesure de la puissance optique sur le port 2 (axe rapide) et le port 1 (axe lent) à l'aide de deux OPMs, avec un seul PBS. [33]

2.5.3. Contrôleurs de polarisation (PC)

Un contrôleur de polarisation (PC pour Polarization Controller) est un dispositif actif ou passif permettant de transformer un état de polarisation quelconque en un état de polarisation désiré. Il réalise une transformation unitaire (sans perte de puissance) sur l'état de polarisation, correspondant à une rotation sur la sphère de Poincaré.

Les principaux types de contrôleurs de polarisation sont :

Contrôleur à lames d'onde rotatives : composé de plusieurs lames d'onde (typiquement $\lambda/4 - \lambda/2 - \lambda/4$) dont les axes peuvent être orientés mécaniquement. La combinaison de trois lames permet d'atteindre n'importe quel état de polarisation sur la sphère de Poincaré. Ce type est simple, peu coûteux, mais lent (temps de réponse de l'ordre de la seconde) [21].

Contrôleur à compression de fibre (squeezers) : proposé par Lefevre [24], il utilise plusieurs spires de fibre monomode enroulées sur des cylindres orientables. L'effet photoélastique induit par la courbure crée une biréfringence variable, permettant le contrôle de la polarisation. Ce type est très compact et entièrement à fibre, avec un temps de réponse de l'ordre de la milliseconde.

Contrôleur électro-optique (EO-PC) : Il exploite l'effet Pockels dans des cristaux électro-optiques ($LiNbO_3$, $LiTaO_3$) ou des polymères pour induire une biréfringence variable par application d'une tension électrique. Ces contrôleurs présentent des temps de réponse très rapides (microsecondes à nanosecondes), adaptés aux systèmes de communication à très haut débit nécessitant un suivi dynamique des fluctuations de polarisation [31][33].

Les contrôleurs de polarisation sont indispensables dans les récepteurs cohérents, dans les systèmes POLMUX, dans les capteurs à fibre de type interférométrique et dans les systèmes d'optique quantique nécessitant des états de polarisation précisément définis. La figure 2.10 illustre les différents accessoires optiques utilisés pour réaliser ce genre de contrôleurs.

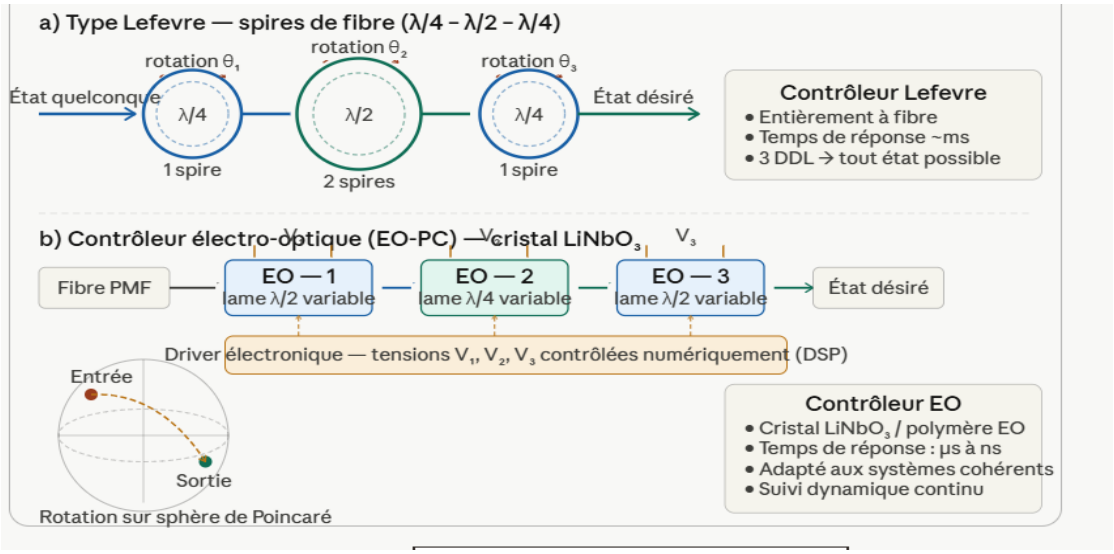


Figure 2.10 : Architectures des contrôleurs de polarisation (PC) : contrôleur à fibre de Lefevre et contrôleur électro-optique [31]

2.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les fondements de la polarisation de la lumière, en couvrant l'ensemble des états de polarisation possibles — linéaire (horizontale, verticale, inclinée), circulaire (droite et gauche) et elliptique — ainsi que les outils mathématiques permettant leur description rigoureuse et leur manipulation.

Le formalisme de Stokes, complété par la représentation géométrique de la sphère de Poincaré, offre un cadre unifié pour décrire tout état de polarisation, qu'il soit totalement ou partiellement polarisé. La matrice de Mueller constitue quant à elle l'outil de choix pour

modéliser l'effet de tout élément optique sur l'état de polarisation, y compris les effets dépolarisants.

Au niveau des composants fibres, la distinction fondamentale entre les fibres monomodes standard (SMF) et les fibres à maintien de polarisation (PMF) a été établie. Si les SMFs sont privilégiées pour la transmission longue distance en raison de leur faible atténuation et de leur faible coût, les PMF s'imposent dans les applications nécessitant un contrôle précis de la polarisation, telles que les capteurs à fibre, les gyroscopes, et les systèmes de communications cohérentes à multiplexage par polarisation.

Enfin, les composants actifs et passifs de gestion de la polarisation : Diviseurs (PBS), combinateurs (PBC) et contrôleurs (PC) constituent les briques élémentaires de tout système optique polarisé. Leur maîtrise est indispensable pour la conception et l'optimisation des systèmes étudiés dans le prochain chapitre [18][26].

Chapitre 3

Réalisation expérimentale et évaluation de dispositifs optiques basés sur la polarisation

3.1. Introduction

Ce chapitre présente la réalisation pratique et l'évaluation expérimentale de plusieurs dispositifs optiques utilisés dans une chaîne de transmission haut débit. Les montages étudiés mettent en œuvre un coupleur optique, un switch, des modules de transmission bidirectionnels, des séparateurs et combinateurs de polarisation PBS/PBC, ainsi que des instruments de mesure de puissance. L'objectif est d'analyser l'influence de la polarisation, les pertes d'insertion et les mécanismes de secours sur la qualité de transmission, à partir des mesures réellement relevées au laboratoire.

3.2. Matériels, instruments et protocole général

Les essais ont été réalisés à l'aide de modules Bidi A et Bidi B, d'un coupleur optique 1×2, d'un switch optique, de diviseurs et combineurs de polarisation (PBS/PBC). Des convertisseurs de média ont été utilisés comme des émetteurs-récepteurs optiques. Les mesures ont été prises à l'aide des multimètres optiques. Le protocole général consiste à configurer le montage suivant une application particulière (multiplexage en longueurs d'onde, multiplexage de polarisation et routage), mesurer les puissances optiques en différents points, comparer les niveaux obtenus, puis interpréter les résultats en termes de niveau d'isolation, affaiblissement du signal, rapport d'extinction et pertes d'insertion. La figure 3.1 et le Tableau 3.1 montrent quelques accessoires optiques utilisés, ainsi que leurs caractéristiques.

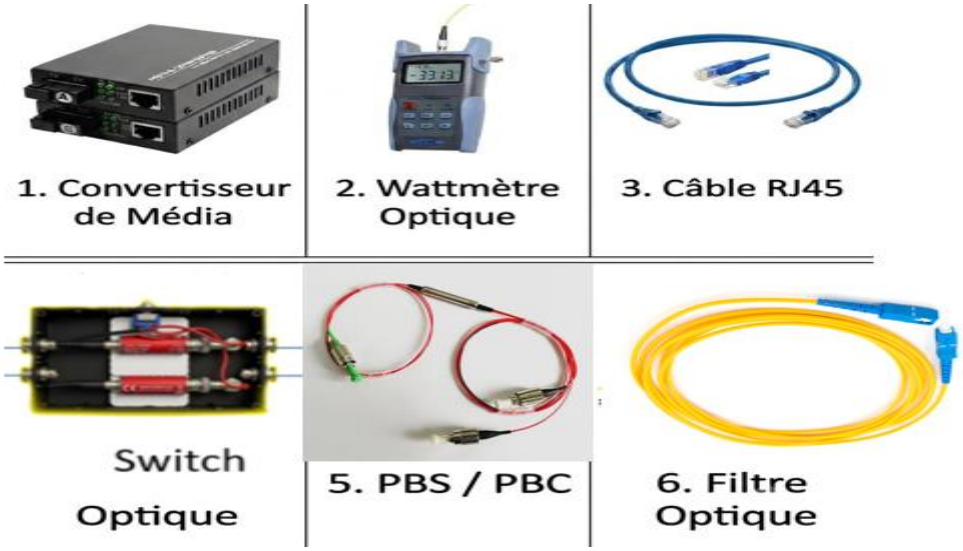


Figure 3.1 : Quelques composants et accessoires utilisés dans les essais expérimentaux.

Élément	Rôle dans le montage	Observation utile
Modules Bidi A et B	Émission et réception optiques bidirectionnelles	Fonctionnement sur deux longueurs d'onde 1310/1550 nm
Coupleur optique 1×2	Répartition du signal sur deux voies	Introduit des pertes d'insertion 50:50
Switch optique	Sélection de la voie active	La performance de commutation dépend de l'isolation et des pertes
PBS	Séparation des composantes de polarisation	Permet d'exploiter les états de polarisation horizontale et verticale
PBC	Recombinaison des composantes orthogonales	Utile pour le multiplexage de polarisation
OPM	Mesure de puissance optique en dBm/Mw	Utilisé pour déterminer les pertes des composants et liaisons

Tableau 3.1 : Caractéristiques des accessoires optiques

3.3. Étude expérimentale du routage optique avec accessoires de polarisation

3.3.1. Réalisation d'un switch optique 1×2 basé sur des atténuateurs optiques

L'objectif de cette première expérience est d'étudier le comportement d'un switch optique 1×2 réalisé avec un coupleur 1×2 et deux atténuateurs optiques variables (VOA). Nous allons évaluer la performance du routage à partir des puissances mesurées sur les deux voies de sortie.

3.3.2. Description du montage

Le signal issu de la source Bidi A (émission sur 1310 nm) est injecté dans un coupleur optique 1×2. La sortie du coupleur est ensuite reliée à un switch optique commandé électriquement, permettant de sélectionner l'une des deux positions de commutation. Les puissances optiques sur les voies de sortie, notées VOA1 et VOA2, sont mesurées à l'aide d'un OPM (Optical Power Meter).

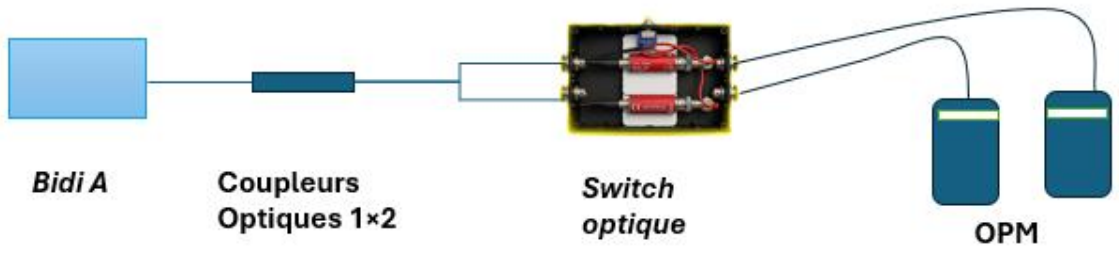


Figure 3.2 : Montage expérimental de couplage optique avec switch et mesure de puissance.

3.3.3. Résultats expérimentaux

Le Tableau 3.2 présente les mesures obtenues à la sortie d'un switch optique fonctionnant avec des atténuateurs opto-électroniques. Le basculement des signaux vers les deux voies du switch est commandé par un levier qui commute entre les tensions DC 5 V et 0 V. On note que pour la tension 0 V , l'atténuateur est transparent. Alors que pour une tension nulle, l'atténuateur laisse passer le signal avec un affaiblissement de 25 dB.

Position du switch	VOA1 (dBm)	VOA2 (dBm)	Voie active
Position gauche	−19,12	−57,20	VOA1
Position droite	−59,10	−12,36	VOA2

Tableau 3.2 : Caractéristiques des accessoires optiques

3.3.4. Calcul du rapport de suppression

Le rapport de suppression, ou rapport d'extinction, est défini comme la différence entre la puissance de la voie active et celle de la voie atténuée. Il s'écrit : $ER = P_{ON} - P_{OFF}$.

$$ER_1 = (-19,12) - (-57,20) = 38,08 \text{ dB}.$$

$$ER_2 = (-12,36) - (-59,10) = 46,74 \text{ dB}.$$

Ces deux valeurs sont largement supérieures à 30 dB, ce qui traduit une bonne isolation entre les voies et la commutation est satisfaisante.

3.3.5. Analyse et discussion

Lorsque le switch est en position gauche, la voie VOA1 porte l'essentiel de la puissance transmise tandis que VOA2 est fortement atténuée. En position droite, le comportement s'inverse. Ce résultat confirme le bon fonctionnement du dispositif de commutation. La valeur plus élevée du rapport de suppression dans le second cas peut s'expliquer par des pertes asymétriques entre les deux branches.

3.4. Étude d'un séparateur de polarisation (PBS)

3.4.1. Objectif

Cette expérience vise à analyser l'effet de la polarisation sur la transmission optique et à observer la répartition de la puissance après séparation par un PBS.

3.4.2. Principe

Les signaux émis par les modules Bidi A (émission 1310 nm) et Bidi B (émission 1550 nm) sont injectés dans un diviseur de polarisation. Le PBS sépare le faisceau incident en deux composantes linéaires orthogonales, ensuite elles sont mesurées individuellement par un OPM, comme le montre la figure 3.3. Le principe de fonctionnement du séparateur de faisceau de polarisation (PBS) est représenté sur la figure 3.4. L'architecture interne est

présentée sur la figure 3.5. On rencontre deux types de PBS/PBC dans l'industrie, un port 3 SM (Single Mode) ou à maintien de polarisation (PM). Pour séparer la polarisation, on fait une rotation de 90° de la clé du connecteur par rapport aux tiges de stress (fast axis, polarisation verticale). Pour prendre une polarisation horizontale, il faut que la clé du connecteur et les tiges de stress (torsion) soient alignés (parallèles). Dans le cas de la figure 3.5 (b), le port de sortie PM capte toujours une polarisation verticale (slow axis), alors que le PBS de la figure 3.5 (a) capte un signal optique sans tenir compte de la nature de polarisation (SM port). Ce dispositif sépare un mode TEM (Transverse Electro Magnetic) en deux polarisations horizontale (H) et verticale (V).

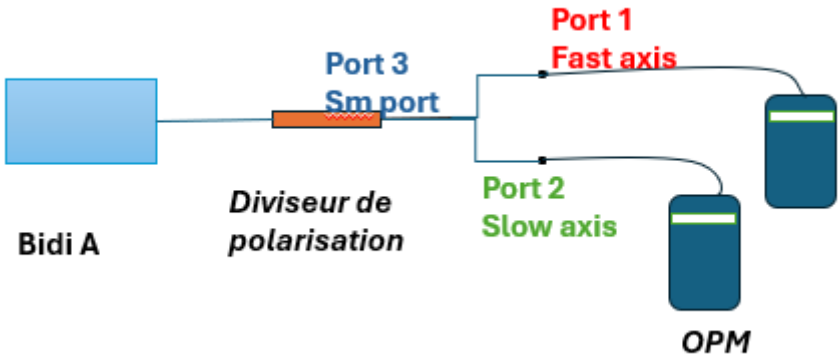


Figure 3.3 : Montage de séparation des composantes de polarisation par un PBS.

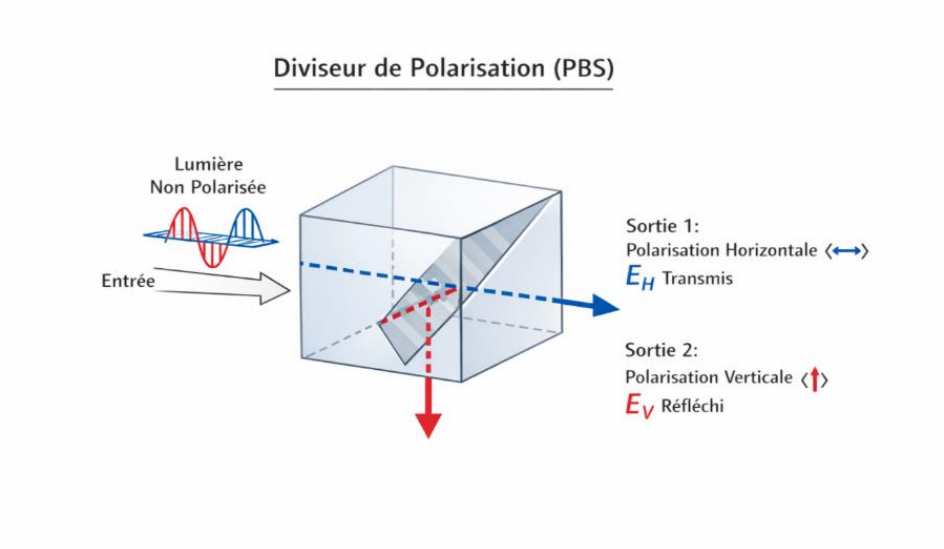
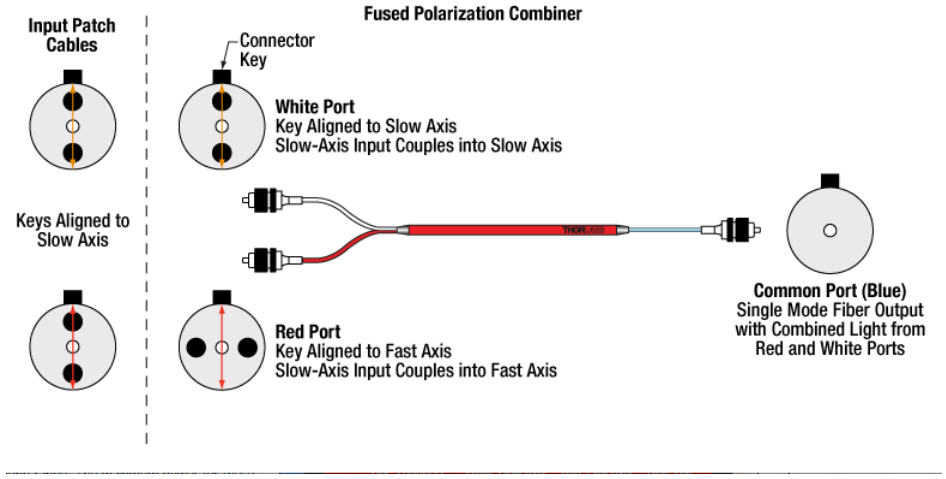
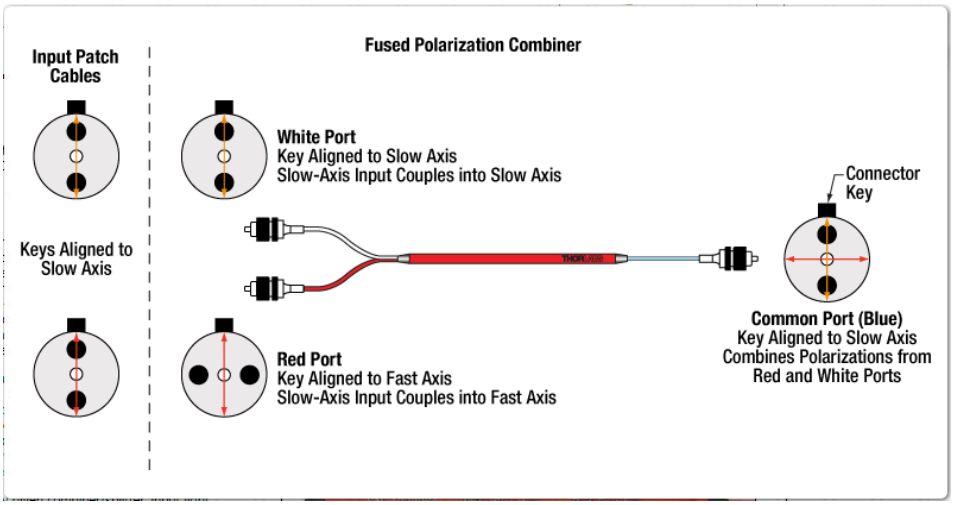


Figure 3.4 : Principe de fonctionnement d'un diviseur de polarisation (PBS).



(a) PBS avec SM port



(a) PBS avec PM port

Figure 3.5 : Architecture interne PBS/PBC.

3.4.3. Résultats et interprétations

Les mesures présentées sur le Tableau 3.3 montrent que le signal injecté peut être décomposé en deux composantes de polarisation orthogonales. La différence relativement faible entre les deux niveaux laisse penser que l'état de polarisation de la source laser initiale est incline avec un angle θ. L'expérience démontre surtout la possibilité de séparer et de mesurer deux composantes orthogonales via le PBS.

Port	Puissance mesurée (dBm)	Interprétation
Port 1	−7,12	Composante associée à la polarisation verticale
Port 2	−7,79	Composante associée à la polarisation horizontale

Tableau 3.3 : Résultats de mesure pour PBS

3.5. Réalisation d'un switch optique avec accessoires de polarisation

3.5.1. Description du montage

Dans cette configuration, le signal optique issu de l'émetteur Bidi A traverse successivement un coupleur optique 1×2, un switch optique puis un PBS/PBC 2×2 en sortie. L'objectif est d'évaluer simultanément la fonction de routage du signal et d'évaluer le rapport de suppression (ER) du switch.

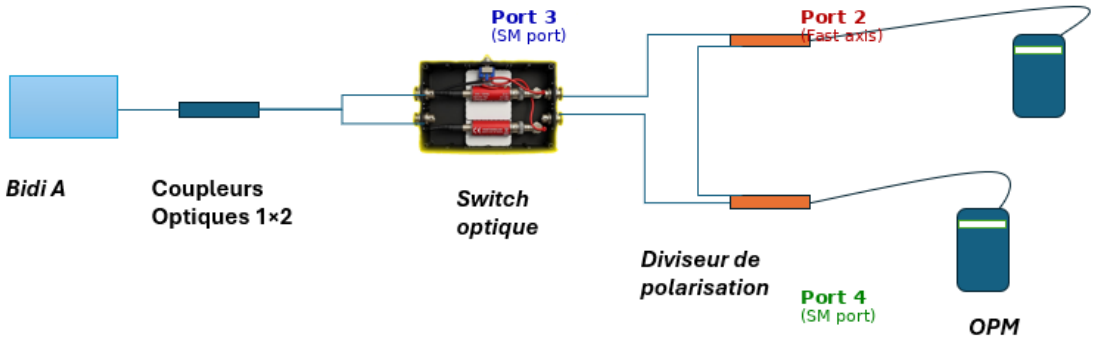


Figure 3.6 : Montage de couplage optique avec séparation de polarisation en sortie.

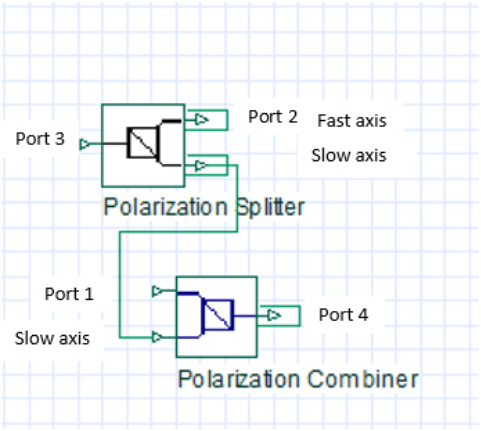


Figure 3.7 : Séparateur/combinateur hybride de polarisation PBS/PBC

Les résultats présentés dans le Tableau 3.4 montrent qu'il y a eu une amélioration du rapport de suppression (45,51 dB pour le premier état de routage et 44,35 dB pour le deuxième état de routage) par rapport à la section 3.3.1 (routeur optique sans accessoires de polarisation ER=38,08 dB). La contribution dans cette partie réside dans l'ajout d'un

séparateur/combinateur hybride de polarisation PBS/PBC 2×2 dont l'architecture est présentée sur la figure 3.7. Les ports 3 (SM port) et 2 (fast axis) reçoivent les signaux issus du switch optique, le dispositif de polarisation permet d'isoler les polarisations horizontale et verticale sur le port 2 (fast axis) et le port 4 (SM port), ce qui réduit considérablement le rapport de suppression de polarisation du switch (PER : Polarization Extinction Ratio).

Position du switch	VOA1 (dBm)	VOA2 (dBm)	ER (dB)
Position gauche	−11,50	−57,01	45,51
Position droite	−56,91	−12,56	44,35

Tableau 3.4 : Résultats de mesure pour le switch avec PBS/PBC 2×2

3.6. Réalisation d'un système de secours optique via PBS/PBC

3.6.1. Principe de fonctionnement

Une autre série d'essais a consisté à mettre en œuvre une liaison bidirectionnelle dans laquelle un PBS sépare le signal en deux composantes de polarisation, transportées par deux voies distinctes (ligne principale et ligne de secours), puis recombinées en sortie par un PBC. Cette architecture introduit une forme de sécurisation optique des signaux transportés : si l'une des voies subit une atténuation ou une défaillance, l'autre peut continuer à transporter une partie utile du signal (voir figure 3.8).

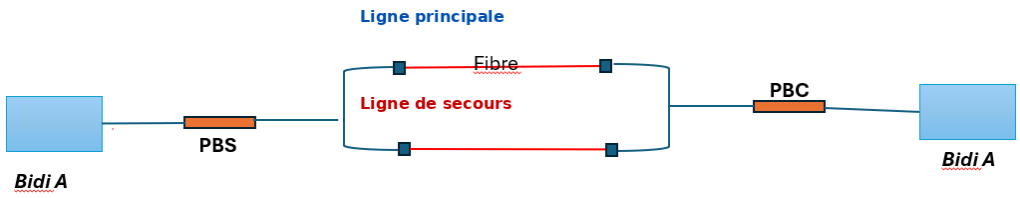


Figure 3.8 : Redondance de liaison à deux voies entre PBS et PBC.

Les résultats présentés sur le Tableau 3.5 montrent que lorsque l'une des lignes de transmission est coupée, une diminution de la puissance reçue est observée, mais sa valeur reste acceptable (autour de −12 dBm).

Configuration	Valeur relevée	Interprétation
Deux voies connectées	P = −0,42 dBm	Puissance reçue avec les deux lignes opérationnelles
Main active / Backup coupée	P = −12,68 dBm	Puissance reçue avec voie principale opérationnelle

Configuration	Valeur relevée	Interprétation
Main coupée / Backup active	P = −12,20 dBm	Puissance reçue avec voie de secours opérationnelle

Tableau 3.5 : Résultats de mesure pour un système de secours avec PBS/PBC

La méthode utilisée dans ce système est la redondance des signaux sur deux voies séparées. D'après les résultats expérimentaux obtenus, on peut conclure que cette méthode peut gérer un flux de données sur une distance maximale réelle de 40 km.

3.6.3. Réalisation d'un multiplexeur optique

Dans cette partie, nous allons comparer deux types de multiplexeurs optiques. Dans le premier multiplexeur, des coupleurs classiques 2×1 et 1×2 sont employés. Dans la deuxième architecture, le multiplexage et le démultiplexage sont assurés par un PBS et un PBC. Les résultats montrent un contraste (niveau d'isolation) d'environ 60 dB dans la première configuration et d'environ 63,6 dB dans la seconde, ce qui confirme qu'on obtient toujours une bonne isolation lorsque les accessoires de polarisation sont exploités. On note que le niveau d'isolation a été déterminé en insérant des filtres FWDM 1310/1550 à la sortie du démultiplexeur (le coupleur pour la première configuration et le PBS pour la deuxième configuration) (voir figure 3.9 et 3.10). On note aussi que les deux longueurs d'onde 1310 et 1550 nm ont été multiplexées par le PBC puis démultiplexées par le PBS. Les émetteurs Bidi A et Bidi B contiennent déjà des filtres FWDM, ce qui a amélioré considérablement le niveau d'isolation du dispositif.

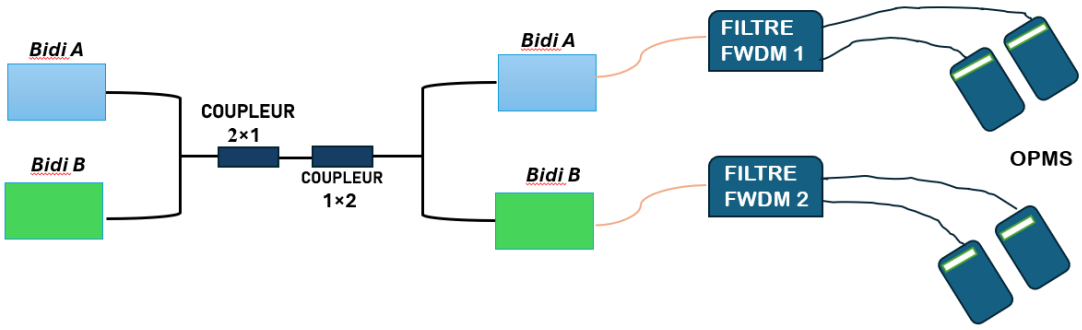


Figure 3.9 : Première architecture de comparaison basée sur des coupleurs passifs.

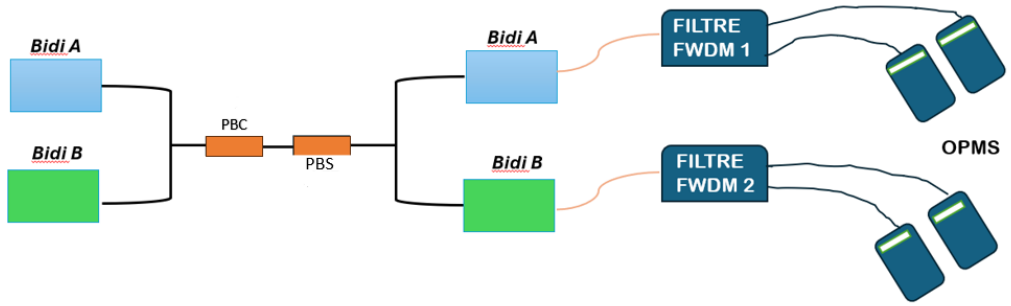


Figure 3.10 : Seconde architecture de comparaison basée sur PBS/PBC.

3.7. Réalisation et test d'un système de secours optique passif OLP

3.7.1. Objectif

Le système OLP (Optical Line Protection) vise à maintenir la continuité de service en cas de défaillance du lien principal, au moyen d'une voie de secours. L'évaluation porte ici à la fois sur les pertes optiques et sur le comportement fonctionnel de la liaison en transmission de données.

3.7.2. Rôle du logiciel Dukto R6

Le logiciel Dukto R6 a été utilisé pour échanger des fichiers entre deux ordinateurs reliés par la chaîne optique via des convertisseurs de média Bidi A et Bidi B. Contrairement à une simple mesure de puissance, ce test permet de valider la connectivité de bout en bout, la stabilité du transfert et l'effet concret d'un basculement entre les chemins Main et Backup.

3.7.3. Cas 1 : liaison de base avec polarisation

Dans le premier cas, la liaison a pour objectif d'assurer la transmission de données entre deux équipements en exploitant la polarisation de la lumière, tout en introduisant une voie de secours. On note que le switch présenté dans la figure 3.11 a pour rôle de couper une ligne et laisser l'autre voie transmettre les données.

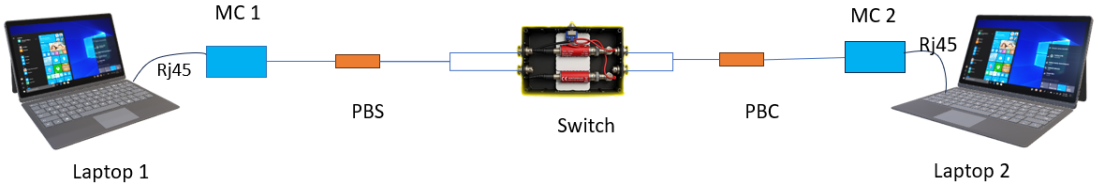


Figure 3.11 : Cas 1 du système OLP : liaison de base utilisant PBS, switch et PBC.

3.7.4. Cas 2 : Ajout d'une fibre de 1 km

Le deuxième cas introduit un chemin comportant environ 1 km de fibre sur les deux voies (principale et secours) et des composants PBS/PBC reliés aux convertisseurs de média Bidi A et Bidi B. Les données sont transférées réellement entre deux ordinateurs via le logiciel Dukto R6. Le logiciel Roadkil's CommTest a été aussi utilisé pour voir le débit de transmission et la latence. La figure 3.16 montre la courbe de latence en variant les longueurs des fibres primaire et secondaire.

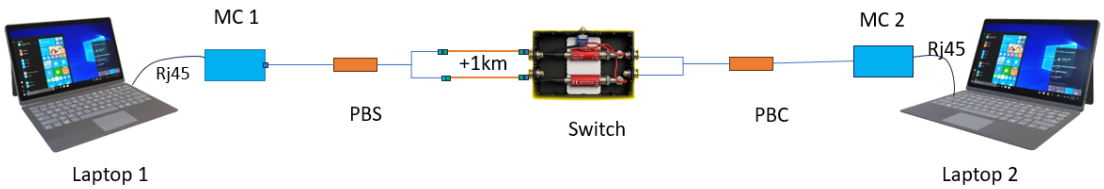


Figure 3.12 : Cas 2 : montage OLP avec environ 1 km de fibre sur une des voies.

Les résultats expérimentaux montrent que pour une longueur de 1 km chacune, la puissance reçue sur le Bidi A est de −16,11 dBm et sur le Bidi B est de −10,20 dBm si l'une des lignes est coupée. Nous concluons que ces résultats sont acceptables. Dans la partie suivante de ce travail, nous allons varier la distance entre la ligne primaire et secondaire et nous observerons la réaction du système de secours dans ces conditions.

On note que ce système de secours optique fonctionne d'une façon totalement passive, c'est-à-dire qu'il fait le basculement automatique entre les lignes sans aucun switch ni élément actif. Le temps de basculement (commutation) entre les deux lignes observé est de 2,5 s, ce qui est considéré acceptable.

3.7.5. Cas 3 : Variation de la longueur des deux lignes de transmission

Le troisième cas étudie une liaison redondante entre deux ordinateurs, avec un chemin principal très court et un chemin Backup de 31 km. Les résultats expérimentaux montrent qu'un niveau de puissance de −12,79 dBm est obtenu lorsque les deux chemins sont actifs, contre −21,30 dBm pour le chemin principal court (quand la ligne de secours de 0 km est coupée) et −15,28 dBm pour le chemin Backup de 31 km.

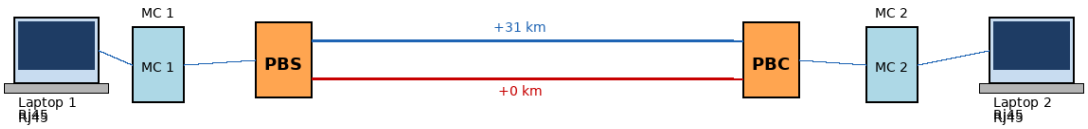


Figure 3.13 : Cas 3 : montage OLP avec environ 31 km de fibre sur une des voies.

Les figures 3.13 et 3.14 montrent la variation des puissances reçues au niveau des récepteurs Bidi A et Bidi B en fonction de la différence de longueur entre les deux lignes. Ces puissances sont mesurées sur un récepteur en cas d'une rupture de l'une des deux lignes de transmission. Nous remarquons d'après ces courbes que les puissances au niveau des récepteurs varient entre – 13,97 dBm et −23,12 dBm. La différence de longueur entre les lignes maximale qu'on peut utiliser égale à 25 km, alors que la longueur maximale acceptable d'une ligne de transmission ne doit pas dépasser 40 km. Les résultats obtenus montrent que ce système de secours peut être placé dans des réseaux à moyenne distance.

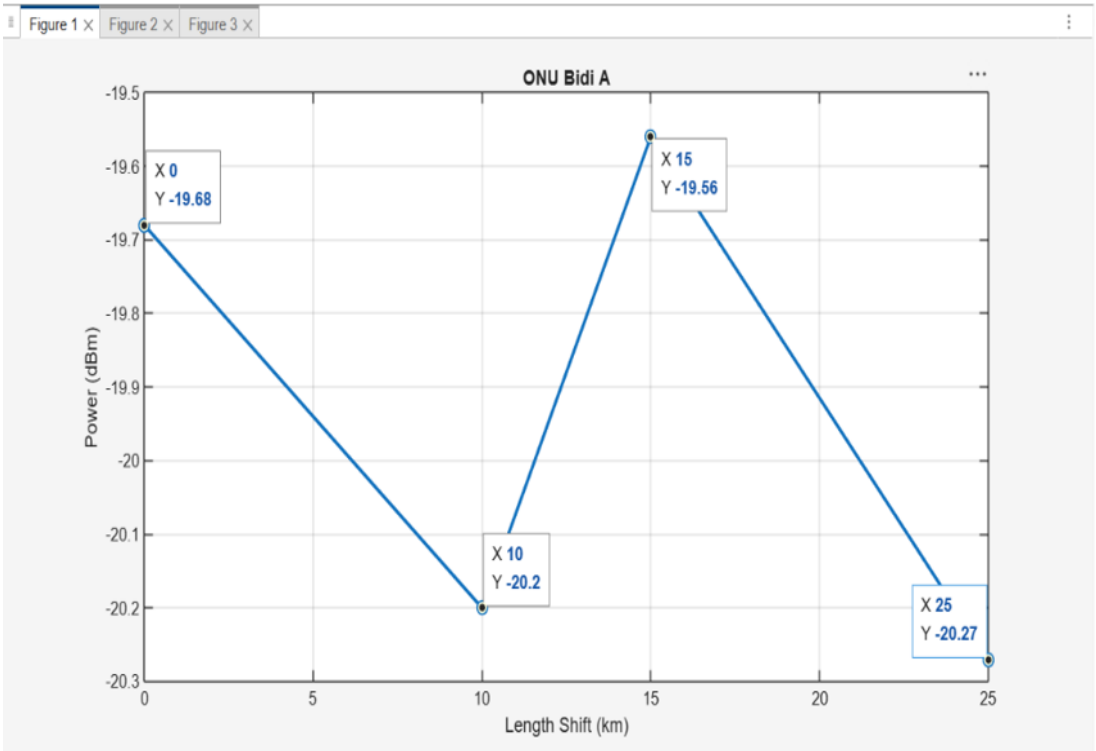


Figure 3.14 : Variation de puissance au niveau Bidi A en fonction de la différence de longueur

La figure 3.16 présente la variation de la latence lors d'un échange de données avec ce système de secours entre deux ordinateurs localement. La courbe de la figure 3.16 montre que la latence devient importante lorsque la différence de longueur entre les deux lignes est grande. Pour la différence de longueur de 25 km, la latence atteint 31 ms, alors que pour une différence de longueur de 15 km, la latence atteint 47 ms à l'instant t4.

On rappelle que le débit de fonctionnement avoisine 10 Mbps et que la liaison est assymétrique, ce qui explique une variation de la latence au cours du temps.

D'après les essais expérimentaux, nous remarquons que lorsque la différence de longueur est petite la latence diminue.

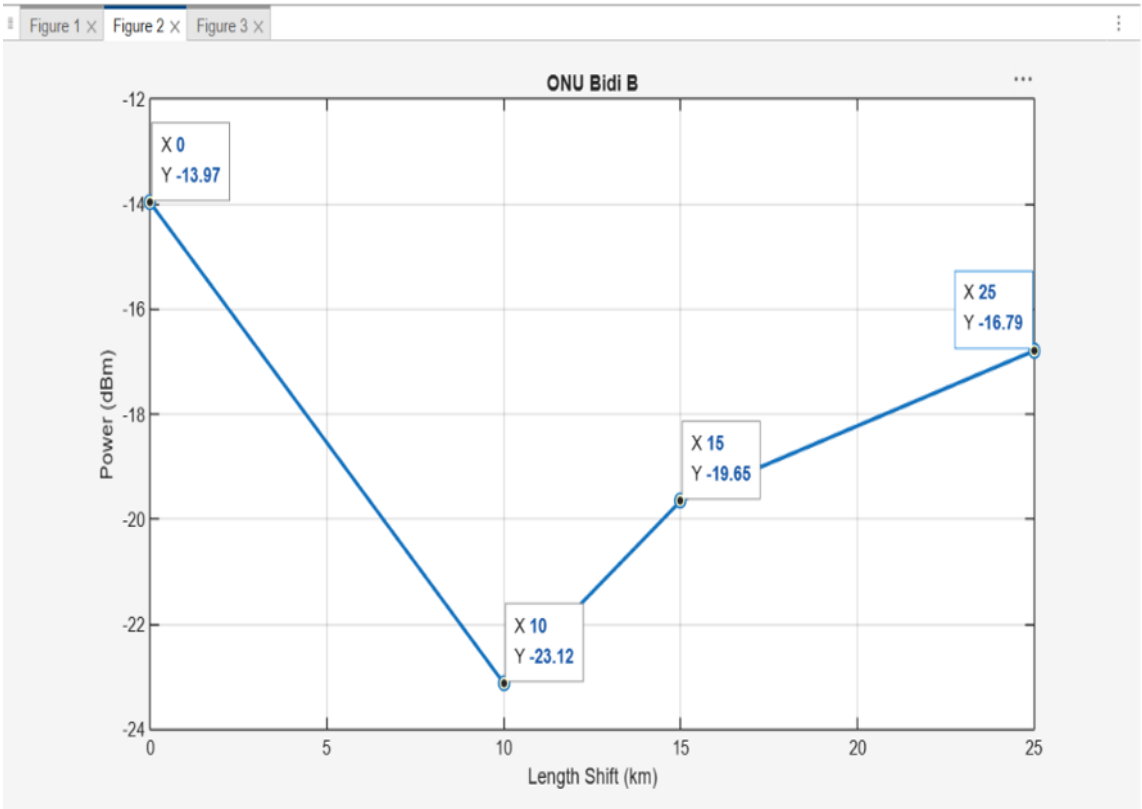


Figure 3.15 : Variation de puissance au niveau Bidi B en fonction de la différence de longueur.

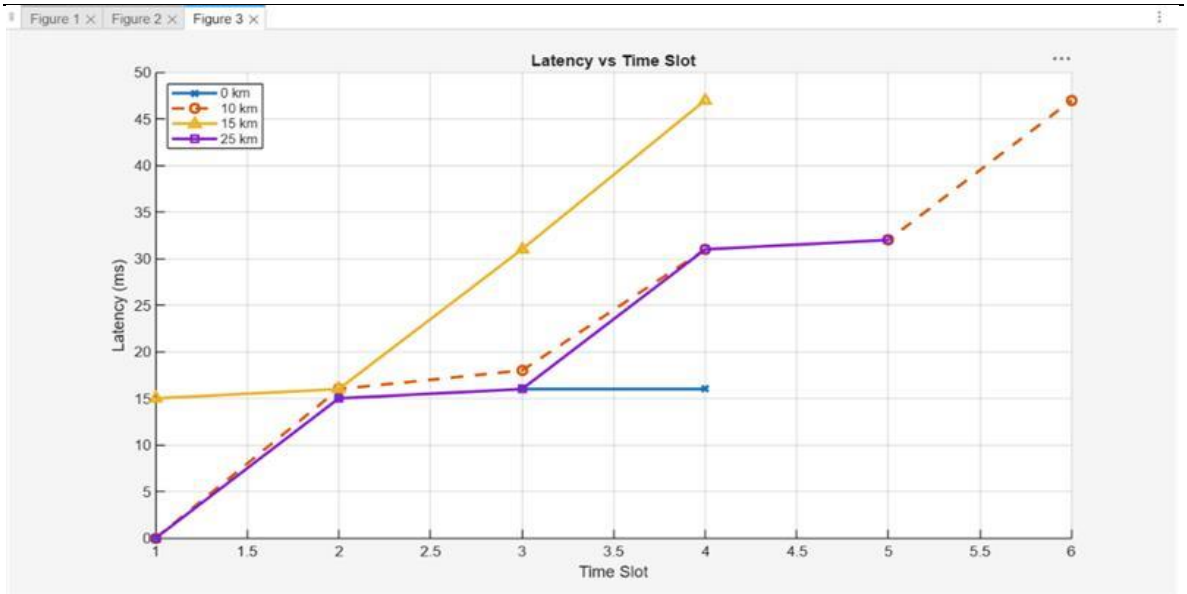


Figure 3.16 : Variation de la latence pour une différence de longueur aux instants tn

Les tests avec le logiciel Dukto R6 confirment que la transmission de données reste stable tant que la puissance reçue demeure dans une zone compatible avec la sensibilité des récepteurs. En revanche, lorsque les pertes deviennent trop élevées, on observe des ralentissements, des interruptions temporaires, voire l'échec du transfert. Ainsi, l'efficacité d'un système OLP ne dépend pas uniquement du principe de redondance, mais aussi du budget optique total, de la latence et du débit de transmission.

3.8. Conclusion

Les essais réalisés dans ce chapitre montrent que la polarisation peut être exploitée de manière concrète dans des fonctions de routage, de multiplexage des voies et de secours optique. L'utilisation d'un PBS et d'un PBC a amélioré le rapport de suppression d'un switch optique 1×2 à plus de 42 dB. Ainsi, ces accessoires optiques de polarisation ont amélioré le niveau d'isolation (contraste) lors d'un multiplexage de deux signaux optiques 1310/1550 nm. Les filtres optiques FWDM ont permis de déterminer ce contraste et de montrer l'impact des séparateurs et combinateurs de polarisation.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons réalisé un système de secours optique passif en utilisant un PBS et un PBC. Ces deux éléments ont séparé les polarisations horizontales et verticales en les transmettant séparément sur deux lignes. En cas de rupture de l'une des voies, les récepteurs ont pu capter une polarisation tout en maintenant le système de transmission opérationnel. La distance maximale qu'on peut atteindre avec ce système

est de 40 km, alors que la différence de longueur maximale entre les deux lignes qu'on peut mettre en œuvre est de 25 km. Les échanges de données avec ce système entre deux ordinateurs ont montré la faisabilité de ce système de secours. La latence obtenue variait entre 0 ms et 47 ms pour un débit de 10 Mbps.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce travail a permis d'explorer, de la théorie à la pratique, le rôle de la polarisation dans les systèmes de transmission optique modernes.

Le Chapitre 1 a posé les fondements des réseaux optiques : fibre optique, architectures, multiplexage WDM, routage optique et formats de modulation avancés. Le Chapitre 2 a détaillé les états de polarisation, les formalismes de Jones et Stokes-Mueller, ainsi que les fibres et composants spécifiques (PMF, PBS, PBC, contrôleurs de polarisation). Ces deux chapitres constituent une base théorique solide pour la compréhension des dispositifs expérimentaux.

Le Chapitre 3 a validé expérimentalement l'apport des accessoires de polarisation. Les résultats obtenus sont particulièrement encourageants :

- L'intégration de PBS/PBC dans un switch optique a amélioré le rapport d'extinction jusqu'à plus de 45 dB.
- L'utilisation de la polarisation pour le multiplexage a permis d'atteindre un niveau d'isolation supérieur à 63 dB.
- Le système de secours optique passif (OLP) basé sur PBS/PBC a démontré sa capacité à maintenir la continuité de service en cas de coupure, avec un temps de basculement acceptable (~2,5 s) et une portée réelle jusqu'à 40 km.

Ces expérimentations confirment que les composants de polarisation constituent des outils puissants, peu coûteux et relativement simples à mettre en œuvre pour améliorer à la fois les performances de routage, le multiplexage et la résilience des liaisons optiques.

Perspectives : Les travaux futurs pourraient porter sur l'intégration de ces dispositifs dans des environnements reconfigurables (ROADM), l'évaluation des performances en présence de modulation cohérente (DP-QPSK, DP-16QAM), ou encore l'optimisation du temps de commutation via des contrôleurs de polarisation rapides. L'exploration de solutions hybrides associant polarisation et multiplexage spatial (SDM) représente également une voie prometteuse.

En conclusion, ce mémoire démontre que la polarisation n’est plus seulement une contrainte à maîtriser, mais un levier technologique stratégique pour les réseaux optiques du futur.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références du chapitre 1

[1] G. P. Agrawal, Fiber-Optic Communication Systems, 5e ed., Wiley-Interscience, New York, 2021.

[2] E. Agrell et al., "Roadmap of optical communications," Journal of Optics, vol. 18, no. 6, art. 063002, 2016.

[3] A. Chraplyvy, "The coming capacity crunch," European Conference on Optical Communications (ECOC), plenary talk, Vienne, 2009.

[4] O. Gerstel et al., "Elastic optical networking: A new dawn for the optical layer?," IEEE Communications Magazine, vol. 50, no. 2, pp. s12-s20, 2012.

[5] IEEE Std 802.3ba-2010, IEEE Standard for Ethernet — 40Gb/s and 100Gb/s Operation, IEEE, New York, 2010.

[6] ITU-T, Recommendation G.709 — Interfaces for the Optical Transport Network, UIT, Genève, 2020.

[7] ITU-T, Recommendation G.872 — Architecture of optical transport networks, UIT, Genève, 2017.

[8] ITU-T, Recommendation G.694.1 — Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid, UIT, Genève, 2020.

[9] ITU-T, Recommendation G.984.x — GPON series, UIT, Genève, 2008-2020.

[10] G. Keiser, Optical Fiber Communications, 5e ed., McGraw-Hill, New York, 2015.

[11] A. D. Kersey et al., "Fiber grating sensors," Journal of Lightwave Technology, vol. 15, no. 8, pp. 1442-1463, 1997.

[12] K. Kikuchi, "Fundamentals of coherent optical fiber communications," Journal of Lightwave Technology, vol. 34, no. 1, pp. 157-179, 2016.

[13] R. Ramaswami, K. N. Sivarajan et G. H. Sasaki, Optical Networks : A Practical Perspective, 3e ed., Morgan Kaufmann, Burlington, MA, 2010.

[14] B. E. A. Saleh et M. C. Teich, Fundamentals of Photonics, 3e ed., Wiley-Interscience, New York, 2019.

[15] J. M. Senior, Optical Fiber Communications : Principles and Practice, 3e ed., Prentice Hall, Harlow, 2009.

[16] P. J. Winzer et R. J. Essiambre, "Advanced optical modulation formats," Proceedings of the IEEE, vol. 94, no. 5, pp. 952-985, 2006.

[17] H. Zang, J. P. Jue et B. Mukherjee, "A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength-routed optical WDM networks," Optical Networks Magazine, vol. 1, no. 1, pp. 47-60, 2000.

Références du chapitre 2

[18] G. P. Agrawal, Fiber-Optic Communication Systems, Wiley, 2021. (Livre)

[19] R. M. A. Azzam et N. M. Bashara, Ellipsometry and Polarized Light, North-Holland, 1987. (Livre)

[20] M. Born et E. Wolf, Principles of Optics, Cambridge University Press, 1999. (Livre)

[21] E. Collett, Field Guide to Polarization, SPIE Press, 2005. (Livre)

[22] D. H. Goldstein, Polarized Light, CRC Press, 2011. (Livre)

[23] S. Huard, Polarisation de la Lumière, Masson, 1994. (Livre)

[24] H. C. Lefevre, "Single-mode fibre fractional wave devices and polarisation controllers," Electronics Letters, vol. 16, n° 20, pp. 778–780, 1980. (Article publié dans une revue)

[25] M. J. Li et D. A. Nolan, "Fiber spin-profile designs for producing fibers with low polarisation mode dispersion," Optics Letters, vol. 23, n° 21, pp. 1659–1661, 1998. (Article publié dans une revue)

[26] J. Noda, K. Okamoto et Y. Sasaki, "Polarization-maintaining fibers and their applications," Journal of Lightwave Technology, vol. 4, n° 8, pp. 1071–1089, 1986. (Article publié dans une revue)

[27] K. Okamoto, Fundamentals of Optical Waveguides, Academic Press, 2006. (Livre)

[28] T. Okoshi, Optical Fibers, Academic Press, 1982. (Livre)

[29] B. E. A. Saleh et M. C. Teich, Fundamentals of Photonics, Wiley, 2019. (Livre)

[30] G. G. Stokes, "On the composition and resolution of streams of polarized light from different sources," Transactions of the Cambridge Philosophical Society, vol. 9, pp. 399–416, 1852. (Article publié dans une revue)

[31] O. Svelto, Principles of Lasers, Springer, 2010. (Livre)

[32] R. Ulrich et A. Simon, "Polarization optics of twisted single-mode fibers," Applied Optics, vol. 18, n° 13, pp. 2241–2251, 1979. (Article publié dans une revue)

[33] A. Yariv et P. Yeh, Photonics: Optical Electronics in Modern Communications, Oxford University Press, 2007. (Livre)