

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب
Université –Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et de Technologie
Département Électroniques et Télécommunications



Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du diplôme de Master en : Télécommunications
Domaine : Science et Technologie
Filière : Télécommunications
Spécialité : Réseaux et Télécommunications

Thème

**Modélisation et Simulation d'un Réseau FTTH
Pour une Connectivité Haut Débit en Milieu Urbain**

Présenté Par :

- 1) Melle. RAHAL Meriem Wafa
- 2) Mr BEN SALAH Marwane

Devant le jury composé de :

Dr MOULESSEHOUL Wassila	MCA	UAT.B. B (Ain Temouchent)	Président
Dr BENOSMAN Mourad	MRA	UAT.B. B (Ain Temouchent)	Examinateur
Dr DEBBAL Mohammed	MCA	UAT.B. B (Ain Temouchent)	Encadrant

Année Universitaire 2024/2025

Remerciements

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

*Nous tenons à exprimer notre sincère gratitude à notre encadrant : **Dr Debbal**, pour sa disponibilité, et son encadrement tout au long de la réalisation de ce mémoire. Son soutien a été déterminant dans l'aboutissement de ce travail.*

Nos remerciements les plus vifs s'adressent aussi aux membres de jury d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre travail.

Nous remercions également l'ensemble des enseignants de la filière Télécommunications, pour la qualité des enseignements dispensés tout au long de notre parcours universitaire.

Enfin, nous adressons nos remerciements les plus chaleureux à nos familles respectives, pour leur soutien moral, leur patience et leurs encouragements constants, qui ont été une source inestimable de motivation tout au long de notre parcours universitaire.

Dédicace

Je dédie ce travail, comme preuve de respect, de gratitude, et de reconnaissance :

À mes chers parents, pour leur dévouement, leur patience, leurs prières et leurs sacrifices – que Dieu les protège et les préserve.

À moi-même, pour ma patience et les obstacles que j'ai surmontés tout au long de mon parcours universitaire.

Et à tous ceux qui ont contribué, directement ou indirectement, à la réalisation de ce travail.

Un profond respect et un remerciement particulier pour mon encadrant : Mr DEBBAL pour la bonne contribution de ce travail.

RAHAL Meriem Wafa



Dédicace

Ce projet fin d'étude est dédié à mes chers parents et, qui m'ont toujours poussé et motivé dans mes études. Sans eux, je n'arrivais certainement pas fait d'études longues. Ce projet fin d'étude représente donc l'aboutissement du soutien et des encouragements qu'ils m'ont prodigué tout au long de ma scolarité. Qu'ils soient remerciés par cette modeste dédicace. Qu'Allah les protège et bénisse leurs vies.

*C'est un moment de plaisir de dédie ce travail :
A mes chers frères et toute ma famille, pour l'espoir et la motivation que vous m'avez donné.*

*A mon binôme, pour ses efforts et son soutien du début à la fin.
A mes chers amis, que j'ai rencontrés au cours de mon parcours académique.*

A notre encadreur Mr Debbal Mohamed, pour la bonne contribution de ce travail.

BEN SALAH Marwane



Résumé

Dans un contexte de demande croissante en connectivité urbaine à très haut débit, la technologie **FTTH** (*Fiber To The Home*) s'impose comme une solution clé pour fournir des services numériques performants aux foyers et aux entreprises. Ce mémoire, intitulé « *Modélisation et Simulation d'un Réseau FTTH pour une Connectivité Haut Débit en Milieu Urbain* », présente une étude comparative de deux architectures **WDM-PON** (topologies en étoile et en arbre hiérarchisé). Des simulations réalisées sous **OptiSystem** examinent l'influence de la puissance d'émission, de la distance de transmission et du débit binaire.

Les résultats, analysés à travers le **facteur de qualité (Q-factor)**, le **taux d'erreur binaire (BER)** et les diagrammes de l'œil, démontrent la supériorité de la topologie en étoile pour les zones urbaines denses. Ce travail propose ainsi des recommandations techniques pour un déploiement optimisé des réseaux d'accès optiques à très haut débit.

Mots-clés

FTTH, WDM-PON, fibre optique, topologie en étoile, topologie en arbre, OptiSystem, Q-factor, BER, réseaux d'accès, connectivité urbaine.

Abstract

In the context of growing urban connectivity demands, **Fiber To The Home (FTTH)** stands out as a key solution to deliver high-speed digital services to households and businesses. This thesis, entitled “*Modeling and Simulation of an FTTH Network for High-Speed Connectivity in Urban Areas*”, presents a comparative study of two **WDM-PON** architectures (star and tree topologies). Simulations were carried out using **OptiSystem**, focusing on three critical parameters : launch power, transmission distance, and bit rate.

Performance metrics, including **Q-factor**, **BER**, and eye diagram analysis, highlight the superior performance of the star topology, making it more suitable for dense urban environments. This work contributes technical guidelines to optimize the deployment of high-performance FTTH access networks.

Keywords

FTTH, WDM-PON, optical fiber, star topology, tree topology, OptiSystem, Q-factor, BER, optical access networks, urban connectivity.

المخلص

في ظل الطلب المتزايد على الربط بشبكة الإنترنت ذات السرعة العالية في المناطق الحضرية، تبرز تقنية FTTH (Fiber To The Home) كحل أساسي لتوفير خدمات رقمية متقدمة للمنازل والمؤسسات. يقدم هذا البحث، بعنوان «نمذجة ومحاكاة شبكة FTTH لتحقيق اتصال عالي السرعة في المناطق الحضرية»، دراسة مقارنة بين هيكليتين لشبكة WDM-PON (الطوبولوجيا النجمية والطوبولوجيا الهرمية). تم إجراء محاكاة باستخدام برنامج OptiSystem لدراسة تأثير ثلاثة معايير رئيسية: قدرة الإرسال، مسافة الإرسال، ومعدل البت.

أظهرت النتائج، التي تم تحليلها من خلال معامل الجودة (Q-factor) ومعدل الخطأ الثنائي (BER) وتحليل مخططات العين، أن الطوبولوجيا النجمية توفر أداءً أفضل وتناسب بشكل خاص البيئات الحضرية ذات الكثافة العالية. تسهم هذه الدراسة في تقديم توصيات تقنية لدعم نشر شبكات الوصول البصرية ذات السرعة العالية بشكل أمثل.

◆ الكلمات المفتاحية:

FTTH، WDM-PON، الألياف البصرية، الطوبولوجيا النجمية، الطوبولوجيا الشجرية، OptiSystem، عامل الجودة، معدل التدفق، شبكات الوصول البصرية، الربط الحضري.

Table des matières

Remerciements.....	i
Dédicace.....	ii
Dédicace.....	ii
Résumé	iv
Abstract.....	v
المخلص	vi
Liste Des Figures	X
Liste Des Tableaux	XI
Liste Des abréviations	XII
Introduction Générale.....	XIV
Chapitre I.....	1
Fibres Optiques et Transmission du Signal	1
I.1 Introduction	2
I.2 Structure et Types de Fibres Optiques.....	2
I.2.1 Composition d'une Fibre Optique	2
I.2.2 Fibres Monomodes et Multimodes	3
I.3 Propagation du Signal Optique	4
I.3.1 Fenêtres de transmission.....	5
I.4 Phénomènes Affectant la Transmission	6
I.4.1 Atténuation du Signal	6
I.4.2 La Dispersion.....	7
I.5 Techniques d'Amplification et de Régénération	8
I.5.1 Les amplificateurs à semi-conducteur (SOA).....	8
I.5.2 Les amplificateurs à fibre dopée (EDFA).....	9
I.6 Conclusion.....	10
Chapitre II.....	11
Présentation de la Technologie FTTH.....	11
II.1 Introduction	12
II.2 La technologie FTTH	12
I.2.1 Présentation.....	12
II.2.2 Principe du FTTH.....	12
II.3 Les avantages du FTTH.....	14
II.4 Architecture du réseau d'accès optique FTTH.....	14
II.4.1 L'architecture point à point (p2p)	15

II.4.2 L'architecture point à multipoint ou PON (réseau optique passif)	16
II.4.3 Comparaison entre les deux architectures P2P et PON.....	17
II.4.4 Critères De Choix	17
II.5 Standards de réseau FTTH.....	18
II.5.1 GPON (Gigabit Passive Optical Network).....	18
II.5.2 EPON (Ethernet Passive Optical Network).....	19
II.5.3 X-GPON.....	19
II.5.4 NG-PON2.....	19
II.6 Composants du réseau FTTH.....	19
II.6.1 Ligne optique terminal OLT (Optical Line Terminal)	20
II.6.2 La fibre optique	20
II.6.3 Coupleur optique (Splitter).....	20
II.6.4 ONT (Optical Network Terminal).....	20
II.7 Défis et Limitations du FTTH	21
II.7.1 L'atténuation	21
II.7.2 La dispersion	21
II.8 Conclusion	22
Chapitre III.....	23
Résultats de Simulation et Analyse Comparative	23
III.1 Introduction.....	24
III.2 Paramètres de qualité d'une liaison optique	24
III.2.1 Le facteur de qualité en amplitude ou facteur Q.....	24
III.2.2 Le taux d'erreurs binaire.....	24
III.2.3 Le diagramme de l'œil.....	25
III.3 Scénario 1 : Analyse des Performances – Topologie en Étoile	25
III.3.1 Effet de la puissance d'émission.....	28
III.3.2 Effet de la distance de transmission.....	32
III.3.3 Effet du débit de transmission	35
III.4 Scénario 2 : Analyse des Performances – Topologie en Arbre.....	38
III.4.1 Effet de la puissance d'émission.....	40
III.4.2 Effet de la distance de transmission.....	43
III.4.3 Effet du débit de transmission	46
III.5 Analyse Comparative entre les Deux Topologies.....	48
III.5.1 Comparaison sur la puissance.....	49
III.5.2 Comparaison sur la distance	50
III.5.3 Comparaison sur le débit	51

III.5.4 Discussion technique	52
III.6 Conclusion	55
Conclusion générale	56
Références.....	57

Liste Des Figures

Chapitre I : Fibres Optiques et Transmission du Signal

Figure I.1 : Structure d'une fibre optique [2].	2
Figure I.2 : Fibre multimodes à saut d'indice [4].	3
Figure I.3 : Fibre multimodes à gradient d'indice.	4
Figure I.4 : la fibre monomode.	4
Figure I.5 : Principe de propagation dans une fibre optique [4].	5
Figure I.6 : Fenêtres de transmission [3].	5
Figure I.7 : Effet de l'atténuation [7].	6
Figure I.8 : Dispersion chromatique.	7
Figure I.9 : Dispersion modale [7].	7
Figure I.10 : Schéma de la structure de l'amplificateur optique à semi-conducteurs.	9
Figure I.11 : Schéma d'un amplificateur optique à fibre dopée aux ions d'erbium [11].	9
Figure I.12 : Synoptique de la régénération 3R (Retiming Reshaping Repeat) [12].	10

Chapitre II : Présentation de la Technologie FTTH

Figure II.1 : Structure d'un réseau FTTH [6].	13
Figure II.2 : Architecture des réseaux FTTH [6].	15
Figure II.3 : Les architectures point-to-point [14].	15
Figure II.4 : Architecture Point-to-Multipoint (PON).	16
Figure II.5 : Différents topologies PON.	17
Figure II.6 : Architecture du réseau d'accès GPON FTTH [16].	18
Figure II.7 : Différents éléments constitutifs d'un réseau FTTH [7].	20

Chapitre III : Résultats de Simulation et Analyse Comparative

Figure III.1 : Le diagramme de l'œil	25
Figure III.2 : Scénario 1 WDM-PON	26
Figure III.3 : Partie d'émission	27
Figure III.4 : Partie de transmission.	27
Figure III.5 : Partie de réception	28
Figure III.6 : Courbe du BER en fonction de la puissance	29
Figure III.7 : Courbe du Q-Factor en fonction de la puissance	30
Figure III.8 : Diagramme de l'œil en fonction de la puissance	31
Figure III.9 : Diagramme de l'œil en fonction de la puissance	31
Figure III.10 : Courbe du BER en fonction de la distance	33
Figure III.11 : Courbe du Q-Factor en fonction de la distance.	33
Figure III.12 : Diagramme de l'œil en fonction de la distance.	34
Figure III.13 : Diagramme de l'œil en fonction de la distance.	34
Figure III.14 : Courbe du BER en fonction du débit	36
Figure III.15 : Courbe du Q-Factor en fonction du débit.	36
Figure III.16 : Diagramme de l'œil en fonction du débit.	37
Figure III.17 : Diagramme de l'œil en fonction du débit.	37
Figure III.18 : Partie d'émission	38
Figure III.19 : Partie de transmission.	38

Figure III.20 : Scénario 2 WDM-PON	39
Figure III.21 : Partie de réception	40
Figure III.22 : Courbe du BER en fonction de la puissance	41
Figure III.23 : Courbe du Q-Factor en fonction de la puissance	41
Figure III.24 : Diagramme de l'œil en fonction de la puissance	42
Figure III.25 : Diagramme de l'œil en fonction de la puissance	42
Figure III.26 : Courbe du BER en fonction de la distance	44
Figure III.27 : Courbe du Q-Factor en fonction de la distance.....	44
Figure III.28 : Diagramme de l'œil en fonction de la distance.....	45
Figure III.29 : Diagramme de l'œil en fonction de la distance.....	45
Figure III.30 : Courbe du BER en fonction du débit	46
Figure III.31 : Courbe du Q-Factor en fonction du débit.....	47
Figure III.32 : Diagramme de l'œil en fonction du débit.....	47
Figure III.33 : Diagramme de l'œil en fonction du débit.....	48
Figure III.34 : Variation du Q-factor en fonction de la puissance – Comparaison des deux scénarios	49
Figure III.35 : Variation du BER en fonction de la puissance – Comparaison des deux scénarios	50
Figure III.36 : Variation du Q-factor en fonction de la distance – Comparaison des deux scénarios	51
Figure III.37 : Variation du BER en fonction de la distance – Comparaison des deux scénarios	51
Figure III.38 : Variation du Q-factor en fonction du débit – Comparaison des deux scénarios	52
Figure III.39 : Variation du BER en fonction du débit – Comparaison des deux scénarios ..	52

Liste Des Tableaux

Chapitre III : Résultats de Simulation et Analyse Comparative

Tableau III.1 : Variation du Q-factor et du BER en fonction de la puissance d'émission	28
Tableau III.2 : Variation du Q-factor et du BER en fonction de la distance	32
Tableau III.3 : Variation du Q-factor et du BER en fonction du débit.....	35
Tableau III.4 : Variation du Q-factor et du BER en fonction de la puissance d'émission	40
Tableau III.5 : Variation du Q-factor et du BER en fonction de la distance	43
Tableau III.6 : Variation du Q-factor et du BER en fonction du débit.....	46
Tableau III.7 : Comparatif des avantages et inconvénients des deux scénarios WDM-PON	54

Liste des abréviations

A

ADSL : Asymmetric Digital Subscriber Line.

ATM : Asynchronous Transfer Mode.

B

BER : Bit Error Rate.

E

EPON: Ethernet Passive Optical Network.

EDFA: Erbium-Doped Fiber Amplifier.

F

FO : Fiber Optique.

FTTx : Fiber To The X.

FTTH : Fiber To The Home.

FAI : Fournisseurs d'accès Internet.

G

GPON : Gigabit Capable Passive Optical Network.

I

IP : Internet Protocol.

ITU : International Télécommunication Union.

ITU-T : Union International des Télécommunications secteur Télécommunication.

L

LASER : Amplificateur de Lumière Par Emission Stimulée.

N

NRO : Nœud Raccordement Optique.

NG-PON2 : Next-Generation-Passive Optical Network 2.

NRZ : Non-Return to Zéro.

O

OLT : Terminal de Ligne Optique.

ONT : Terminal de réseau Optique.

ONU : Unité de réseau Optique.

ODF : Optical Distribution Frame.

OptiSystem : Optical Communication System Design.

P

P2P : Point to Point.

PON : Passive Optical Network.

PBO : Point de Branchement Optique.

PTO : Prise Terminale Optique.

PIN : Positive Intrinsèque Négative Photodiode

Q

Q-factor : facteur de qualité.

R

3R : Régénérateur Type 3R (Retiming Reshaping Regenerating).

S

SOA : Semi-conducteur Optical amplifieur

SRO : Sous Répartiteur Optique.

T

TDM : Time Division Multiplexing.

V

VDSL : Very high bit rate Digital Subscriber Line (Ligne Numérique d'Abonnée très haut débit).

W

WDM : Wavelength Division Multiplexing.

WDM-PON : Wavelength Division Multiplexing -Passive Optical Network.

X

XG-PON : Dix Gigabit -Passive Optical Network.

Introduction Générale

L'explosion des besoins en connectivité, stimulée par le développement des services multimédias, de l'Internet des objets (IoT), place la fibre optique au cœur des stratégies d'évolution des réseaux de télécommunications. Parmi les solutions d'accès les plus prometteuses figure la technologie FTTH (Fiber To The Home), qui permet de raccorder chaque abonné par une liaison optique dédiée, garantissant des débits extrêmement élevés, une faible latence, et une stabilité inégalée.

Dans ce contexte, le présent travail de fin d'études s'inscrit dans une logique d'analyse et d'optimisation des réseaux FTTH, avec une attention particulière portée à la modélisation et à la simulation de scénarios réels d'architecture optique. Il vise à évaluer la faisabilité et les performances d'un réseau FTTH basé sur une transmission WDM-PON, en milieu urbain, et à proposer des choix techniques adaptés aux contraintes de distance, de débit et de puissance.

La méthodologie adoptée combine :

- Une revue approfondie des bases théoriques relatives à la propagation optique, aux composants de transmission et aux architectures FTTH.
- Une analyse détaillée des architectures P2P et PON, avec leurs standards (GPON, XG-PON, NG-PON2) et composants clés (OLT, ONT, splitters).
- Une simulation avancée sous OptiSystem, comparant deux scénarios topologiques (étoile vs arbre), à travers des critères objectifs : Q-factor, BER, et diagrammes de l'œil.

Au-delà de la dimension académique, ce travail se veut pratiquement utile pour les ingénieurs, décideurs et opérateurs télécoms, en apportant des éléments tangibles d'aide à la décision pour le déploiement de réseaux FTTH performants et adaptés aux exigences croissantes du très haut débit.

Le mémoire est structuré en trois chapitres :

- Le premier chapitre introduit les principes de transmission sur fibre optique et les phénomènes physiques impactant les performances.
- Le deuxième chapitre présente en détail la technologie FTTH, ses architectures, ses composants, et ses standards internationaux.
- Le troisième chapitre expose les résultats des simulations, compare les performances des deux topologies étudiées, et formule des recommandations techniques.

Chapitre I

Fibres Optiques et Transmission du Signal

I.1 Introduction

Les systèmes numériques les plus rapides transmettent des informations à un débit de 10 Mbits/s, et le câble coaxial est bien adapté pour remplir sa fonction de support de transmission, mais avec l'émergence de nouveaux services liés au développement du multimédia, le besoin de débits de transmission d'informations plus élevés a conduit à l'émergence d'alternatives au câble coaxial en raison de pertes excessives, de courtes distances de propagation et de performances limitées.

Dans les systèmes de télécommunications modernes, le support de transmission privilégié est la fibre optique.

L'objectif de la fibre optique dans les réseaux modernes est de transmettre l'information le plus loin possible avec la plus grande bande passante possible et avec la plus faible atténuation possible. À cet égard, l'utilisation de la fibre optique comme support de transmission semble être le moyen le plus fiable et le plus sûr par rapport aux autres supports de transmission existants.

I.2 Structure et Types de Fibres Optiques

I.2.1 Composition d'une Fibre Optique

Une fibre optique est un fil de verre très fin qui a la propriété de conduire la lumière et sert dans les transmissions des données.

La fibre optique qui se présente comme un guide d'onde cylindrique et diélectrique, Elle est constituée de deux diélectriques de même axe, le cœur et la gaine, entourés d'une gaine de protection [1].

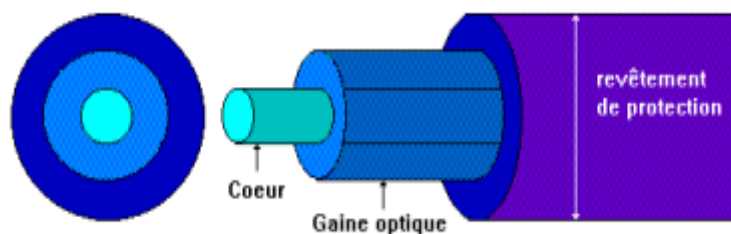


Figure I.1 : Structure d'une fibre optique.

- **Le cœur :** Est un milieu dans lequel une quantité d'énergie lumineuse véhiculée au sein de la fibre sera confiné au voisinage du centre dont l'indice de réfraction n_1 est dans laquelle se propage la lumière. Cette composante est constituée en majorité de silicium, enrichi avec d'autres éléments. Le diamètre du cœur varie de 8-10 μm à 62,5 μm selon le type de fibre.
- **La gaine optique :** Couche de verre qui entoure le cœur, est composée généralement du même matériau que le cœur, mais la composition du verre utilisée est différente de celle du cœur., son indice de réfraction n_2 est bien inférieur à celui du cœur. Cela permet justement à la lumière de se réfléchir. Le diamètre de la gaine est de l'ordre de 125 μm .
- **Revêtement :** Aussi appelé la gaine protectrice, assure à son tour la protection mécanique adéquate à la fibre optique, fabriquée fréquemment en plastique [2, 3].

I.2.2 Fibres Monomodes et Multimodes

Selon le diamètre du cœur et la longueur d'ondes utilisée, Les fibres optiques peuvent être classées en deux types :

- **Multimode** : dans lequel il existe différents modes de propagation de la lumière au sein du cœur de la fibre.
- **Monomode** : dans lequel il existe un seul mode de propagation de la lumière, le mode en ligne droite.

I.2.2.1 La fibre multimode

La fibre multimode est mieux utilisée pour les réseaux locaux, les réseaux à faible débit ou les longueurs d'onde proches de 850 nm et 1300nm.

Cette fibre est utilisée pour les courtes distances, a un débit de transmission allant jusqu'à Gbit/s et possède un diamètre de cœur plus grand (environ 50 μ m). Conçus pour transmettre des rayons lumineux simultanément, ces rayons peuvent emprunter des chemins différents selon l'angle de réfraction. Par conséquent, les rayons peuvent arriver au bout de la ligne à des moments différents, et le signal produira une certaine dispersion.

Parmi les fibres multimodes, on distingue les fibres à saut d'indice (limite de débit 50 Mb/s) et les fibres à gradient d'indice (limite de débit 1 Gb/s) [4, 5].

- a- **Fibre à saut d'indice** : Dans ce type de fibre, l'indice de réfraction « n » reste constant dans tout le cœur. Lorsque le signal rencontre la gaine, il se réfléchit soudainement, ce qui provoque une grave distorsion du signal.

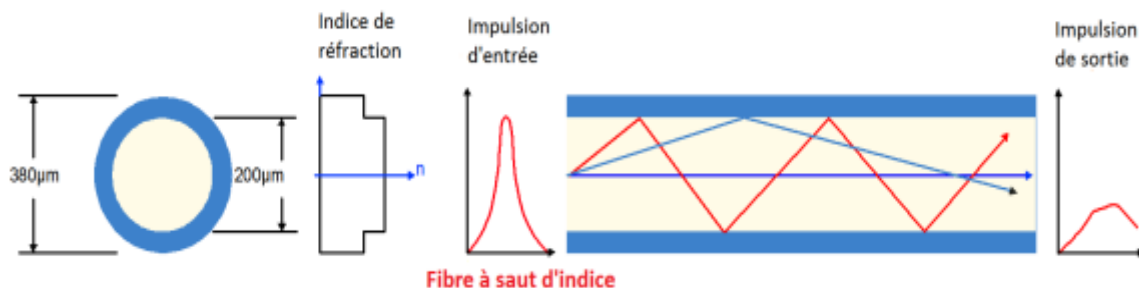


Figure I.2 : Fibre multimodes à saut d'indice [4].

- ✓ Débit : environ 50 Mbit/s
- ✓ Portée maximale : environ 2 Km
- ✓ Affaiblissement : 10 dB/Km

- b- **Fibre à gradient d'indice** : Cette fibre présente un indice de réfraction du cœur variable, qui diminue de façon parabolique du centre du cœur à la limite cœur/gaine. L'abaissement de l'indice de réfraction permet à la lumière de se déplacer plus rapidement, réduisant ainsi la dispersion [3].

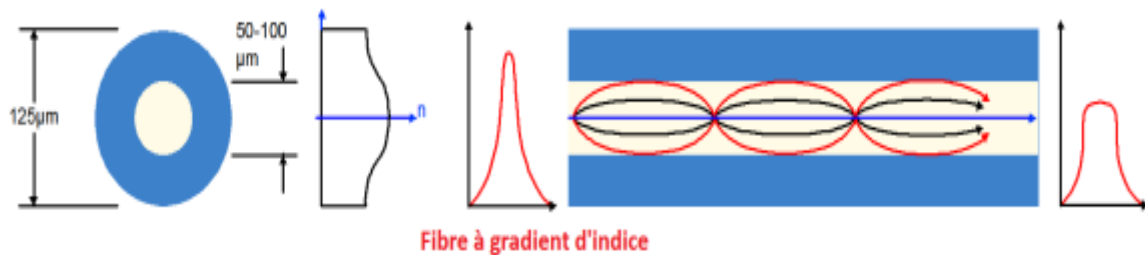


Figure I.3 : Fibre multimodes à gradient d'indice

- ✓ Débit : environ 1 Gbit/s
- ✓ Portée maximale : environ 2 Km
- ✓ Affaiblissement : 10 dB/Km

I.2.2.2 La fibre monomode

La fibre monomode est principalement utilisée pour les connexions longue distance et à haut débit, cette fibre possède un cœur très fin (8 à 10 μm) qui ne permet qu'un seul mode de propagation avec des pertes minimales. De cette façon, la diffusion du signal produite est très faible et peut être considérée comme nulle.

La bande passante est pratiquement illimitée, supérieure à 10 Gbps/Km, avec une longueur d'onde de coupure de 1,2 μm . Diamètre de cœur très faible (9 μm) et ouverture numérique sont si faibles que les rayons lumineux se déplacent en parallèle avec le même temps de trajet.

Le diamètre plus petit du cœur de la fibre nécessite une puissance de lancement plus élevée, qui est fournie par la diode laser. La longueur d'onde utilisée est 1310, 1550 et 1625 nm.

Le débit est environ 100 Gbit/s avec une portée maximale de 100 Km et un affaiblissement de 0,5 dB/Km [6].

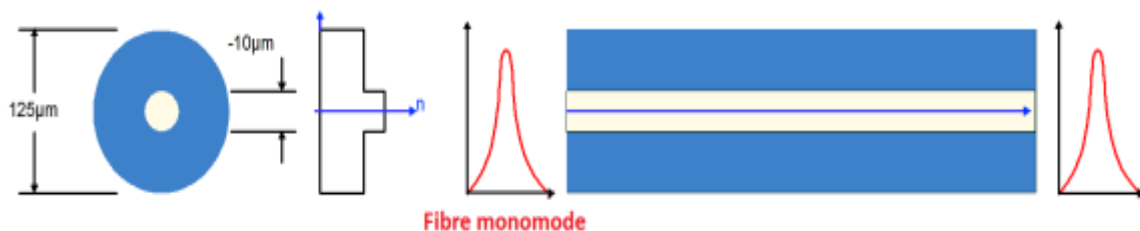


Figure I.4 : la fibre monomode

- ✓ Débit : environ 100 Gbit/s
- ✓ Portée maximale : environ 100 Km.
- ✓ Affaiblissement : 0,5 dB/Km

I.3 Propagation du Signal Optique

Le signal lumineux dans la fibre optique se propage grâce à la réflexion totale entre le cœur et la gaine optique, où l'indice de réfraction est différent.

Lorsque le rayon lumineux frappe la surface de séparation de deux milieux différents, il se divise en deux rayons :

- **Un rayon réfléchi** qui se propage encore dans le premier milieu.
- **Un rayon réfracté** qui se propage dans le second milieu.

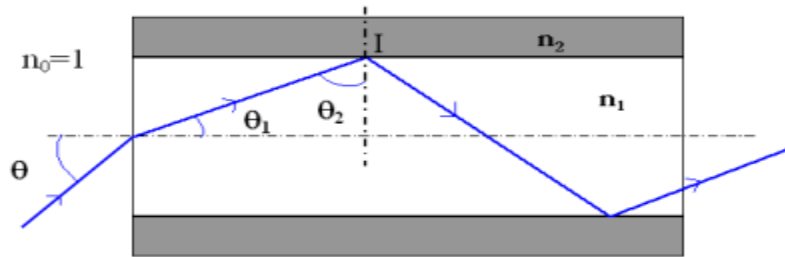


Figure I.5 : Principe de propagation dans une fibre optique [4].

La loi de Snell Descartes permet de relier l'angle de la lumière incidente à l'angle réfracté en fonction des indices des milieux :

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (1)$$

Pour $n_1 > n_2$, il existe un angle d'incidence θ_c , appelé angle critique, pour lequel la lumière n'est pas transmise et au-delà duquel elle est totalement réfléchi, c'est bien entendu la réflexion totale [7].

I.3.1 Fenêtres de transmission

La fenêtre optique est une zone du domaine des longueurs d'onde optiques pour laquelle la fibre optique présente des affaiblissements faibles. Il existe trois fenêtres utilisées : 850 nm, 1300 nm et 1550 nm.

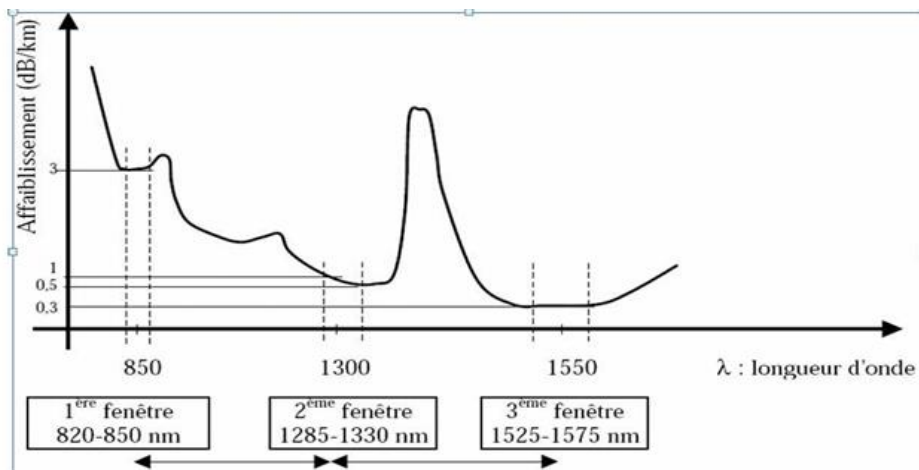


Figure I.6 : Fenêtres de transmission [3].

- ❖ La fenêtre à 0.8 μm correspond à une atténuation de 2.5dB/Km en moyenne et a été historiquement la première utilisée.
- ❖ La fenêtre à 1.3 μm , d'atténuation moindre (0.7dB/Km en moyenne) est intéressante, car il est possible de compenser la dispersion du matériau par les dispersions du guide et d'onc d'obtenir de meilleures performances en capacité de transmission tout en améliorant les distances.
- ❖ La fenêtre à 1.5 μm est intéressante pour les applications à très longue distance (0.2dB/Km de pertes pour les fibres monomodes), à condition de disposer de sources modulées à spectre étroit (dispersion du matériau) [7].

Les fenêtres 1 et 2 résultent d'un compromis technico-économique entre l'atténuation apportée par la fibre et les composants optoélectroniques utilisées en fonction des applications. La fenêtre 3 correspond à l'atténuation minimale mais exige des composants optoélectroniques très performantes, elle est réservée aux applications à haut débit et longues distances.

I.4 Phénomènes Affectant la Transmission

I.4.1 Atténuation du Signal

L'atténuation dans la fibre optique représente l'affaiblissement du signal lors de la propagation. Elle est mesurée en dB/km, varie en fonction de la longueur d'onde, et correspond aux pertes en ligne dues à différents phénomènes de propagation et a la forme :

$$\alpha [dB] = 10 \log (P_e/P_r) \quad (2)$$

Avec :

α : l'atténuation

P_e : la puissance lumineuse à l'entrée

P_r : la puissance lumineuse à la sortie



Figure I.7 : Effet de l'atténuation [6].

Les principales causes d'atténuation sont :

a- Absorption

Ce facteur est causé par l'absorption de la lumière et la conversion en chaleur par des molécules dans le verre et les dopants utilisés pour modifier l'indice de réfraction du verre se produit à des longueurs d'onde discrètes, déterminées par les éléments absorbant la lumière. L'absorption d'OH⁻ est prédominant qui présente un pic de forte atténuation, elle se produit le plus fortement autour de 1000 nm, 1400 nm, et au-dessus de 1600 nm.

b- Diffusion

D'autre part, la plus grande cause d'atténuation est la diffusion principalement la diffusion de Rayleigh, qui se produit lorsque la lumière entre en collision avec les atomes individuels dans le verre ; elle provoque la dispersion de l'énergie lumineuse dans toutes les directions. La lumière qui est dispersée à des angles dehors de l'angle critique de la fibre sera absorbée dans la gaine de la fibre ou même transmis vers la source. Il y a deux autres modes de la diffusion de la lumière : diffusion Raman et Brillouin scattering. Les systèmes à fibres optiques transmettent dans les fenêtres créées entre les bandes d'absorption à 850 nm, 1300 nm et 1550 nm, où la physique permet également de fabriquer facilement des lasers et des détecteurs [6].

c- Courbures de la fibre

Les obstacles sur terrain peuvent nécessairement nous obliger à courber la fibre optique afin de pouvoir les franchir. A l'intérieur du câble, cette fibre suit un trajet hélicoïdal,

c'est une courbure. Dans une transmission par fibre optique, la fibre peut entrer en contact avec les éléments constitutifs du câble, ce qui peut créer des micro courbures [4].

I.4.2 La Dispersion

Le phénomène de dispersion se traduit par un élargissement des impulsions au cœur de leur propagation, cet élargissement limite la bande passante du canal de fibre optique.

I.4.2.1 Dispersion Chromatique

La dispersion chromatique exprimée en $PS/(nm.km)$, caractérise l'étalement du signal lié à sa largeur spectrale (deux longueurs d'onde différentes ne se propagent pas exactement à la même vitesse). Cette dispersion dépend de la longueur d'onde considérées résulte de la somme de deux effets : la dispersion due au matériau (l'indice qui varie en fonction de la longueur d'onde), et la dispersion du guide (la vitesse de groupe qui varie avec la longueur d'onde).

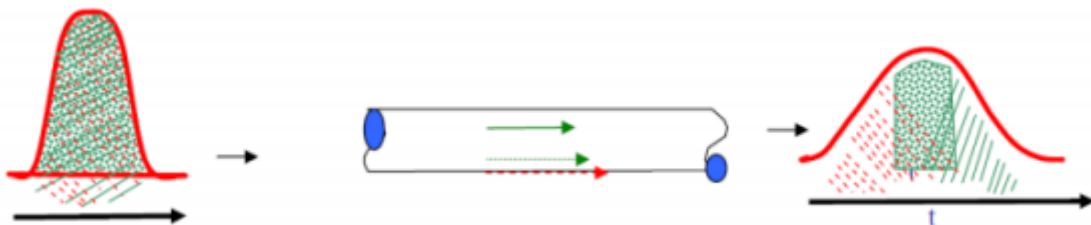


Figure I.8 : Dispersion chromatique

Les deux types de dispersion, guide et matériau, se compensent ainsi exactement à la longueur d'onde de 1310nm donnant ainsi une dispersion chromatique nulle pour cette longueur d'onde.

I.4.2.2 Dispersion modale (ou intermodale)

Dans une fibre optique multimode, plusieurs modes se propagent, chacun suit une trajectoire différente. L'énergie lumineuse transmise se répartie entre les différents modes qui se propagent dans le cœur. L'ensemble des retards entre les différents rayons composant le signal lumineux introduit en réception une distorsion du signal électrique ; cette distorsion est la dispersion intermodale.

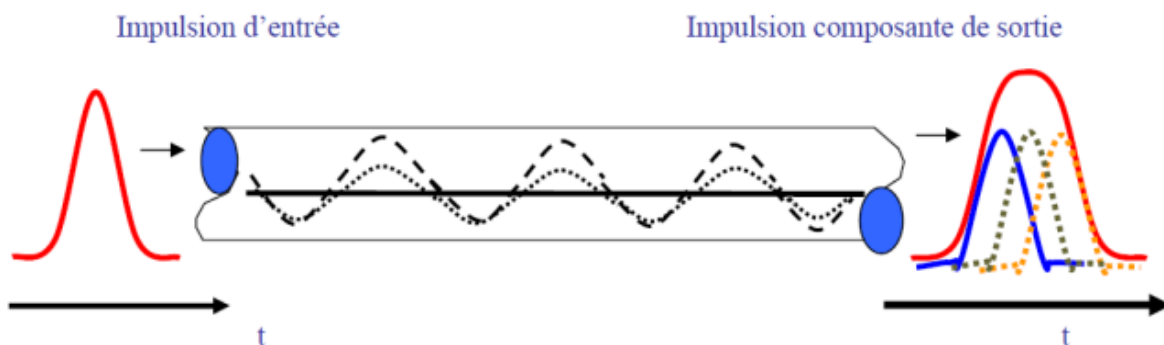


Figure I.9 : Dispersion modale [6].

Dans le cas d'une fibre monomode, la dispersion modale n'existe pas (en pratique, elle est quasiment nulle). Le mode de propagation étant unique (une ligne droite), il n'y a pas de dispersion dû au fait qu'un signal peut prendre plusieurs chemins différents.

Compensation des pertes

Les pertes dans une liaison optique peuvent être compensées par l'utilisation d'amplificateurs optiques qui ont pour but :

- a- Régénération
- b- Régénération et remise en forme
- c- Régénération, remise en forme et synchronisation Ainsi le signal atténué est restitué.
- d- Amplificateur optique à semi-conducteur**

La lumière incidente rentre dans le circuit de l'amplificateur, elle est amplifiée et sort de l'autre extrémité pour être couplée dans la fibre.

e- Amplificateur optique à fibre dopée en Erbium

C'est un amplificateur optique à fibre dopée aux ions d'erbium.

Il est composé de trois éléments :

- La fibre dopée elle-même
- Une source d'excitation de la fibre, cette source est un laser de puissance élevée, appelé laser de pompage
- Un multiplexeur qui permet de coupler dans la fibre le signal à amplifier ainsi que le laser de pompage.

I.5 Techniques d'Amplification et de Régénération

Au sein des systèmes de communication optique, durant leur parcours dans la fibre, le signal lumineux est soumis à des atténuations. Cela nécessite un renforcement du signal pour garantir la transmission sur de longues distances. Deux techniques principales sont utilisées : **l'amplification et la régénération.**

I.5.1 Les amplificateurs à semi-conducteur (SOA)

Un Amplificateur optique à semi-conducteur (Semi-conducteur Optical amplifier SOA) est un composant qui a amplifié la lumière incidente grâce au phénomène d'émission stimulée dans un matériau semi-conducteur. Son élément principal est la région active qui fournit le gain optique lorsque l'amplificateur est pompé électriquement. Il est réalisé grâce à une jonction PN (hétérostructure) polarisée en direct, la jonction permettant alors l'inversion de population au sein de ce composant. Le pompage est nécessaire pour atteindre l'inversion de population et par conséquent l'émission stimulée. Un guide d'onde intégré est utilisé pour confiner l'onde de signal à la région active.

La structure de base du SOA ressemble, à première vue, à celle d'une diode laser de type Fabry Pérot comprenant un milieu amplificateur, de longueur L , de largeur w et d'épaisseur d , dans une structure guidant. Néanmoins, les facettes d'entrée et de sortie du SOA sont très peu réfléchissantes, grâce au traitement antireflet.

Ce phénomène (émission stimulée) est provoqué dans un milieu actif à base de matériaux semiconducteurs, due à une inversion de population assurée par un pompage électrique à travers

l'électrode du composant. Ainsi les photons d'émission stimulée s'ajoutent au signal optique confiné dans le guide monomode et l'amplifient [8].

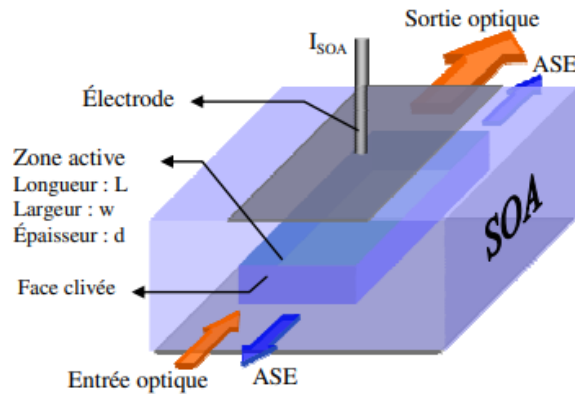


Figure I.10 : Schéma de la structure de l'amplificateur optique à semi-conducteurs.

I.5.2 Les amplificateurs à fibre dopée (EDFA)

Un amplificateur optique à fibre amplifie la lumière grâce au mécanisme d'émission stimulée. Les éléments actifs sont plus couramment des ions d'Erbium. Si un photon interagit avec un électron dans l'état métastable, un effet quantique de résonance produit le retour de l'ion dans l'état fondamental et un photon est émis avec les mêmes caractéristiques que le photon incident. À partir d'un photon on obtient ainsi deux : c'est la base de l'amplification optique. Mais l'amplification l'emporte si les photons rencontrent plus d'ions dans l'état métastable que dans l'état fondamental. Cette condition est désignée par le terme « inversion de population » et est obtenue par l'opération de pompage par exemple à la longueur d'onde de 980 nm [9].

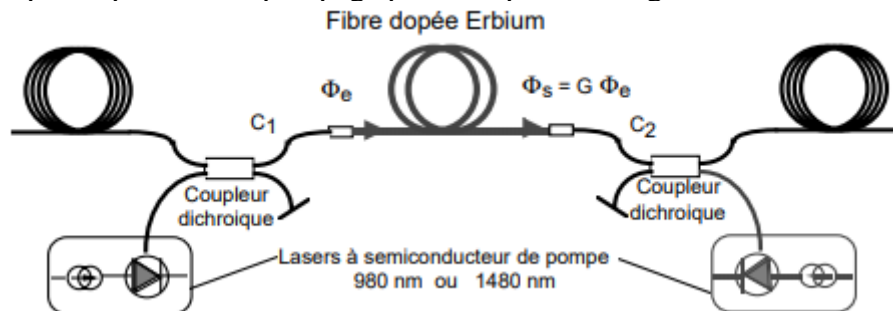


Figure I.11 : Schéma d'un amplificateur optique à fibre dopée aux ions d'erbium [10].

Les photons de la pompe excitent les particules actives et les font passer de l'état fondamental à l'état supérieur. Ces dernières ayant une durée de vie très courte. Les particules actives retombent très rapidement au niveau métastable.

I.5.3 Régénérateur 3R

La régénération 3R, pour Retiming Reshaping Repeater, réalise les trois étapes nécessaires à une régénération complète des données : une amplification et une remise en forme du signal, étapes 1 et 2R, ainsi qu'une resynchronisation des données dans leur temps bit. En effet, comme nous l'avons vu lors de la présentation des diverses dégradations subies par le signal au cours de sa propagation, les symboles binaires qui forment le signal peuvent se décaler temporellement au sein de leur temps bit, ce à cause notamment de la dispersion de mode de polarisation ou du couplage entre le signal et le bruit d'émission spontanée amplifiée. Ce décalage peut créer des interférences entre symboles ou de la gigue temporelle, phénomènes

qui perturbent la détection de l'information. La resynchronisation des données est donc une étape importante de la régénération. Pour réaliser cette régénération complète, les dispositifs 3R sont généralement basés sur le principe des régénérateurs 2R en modulation croisée auquel est associée une récupération d'horloge.

En ce qui concerne la récupération d'horloge, il s'agit d'une fonction qui permet de générer une horloge optique de faible gigue temporelle dont la fréquence est calée sur celle des données à régénérer. Ainsi, la resynchronisation se fait en remplaçant le signal continu de la régénération 2R par une telle horloge optique et en la synchronisant exactement pour que les impulsions se situent au milieu du temps bit.

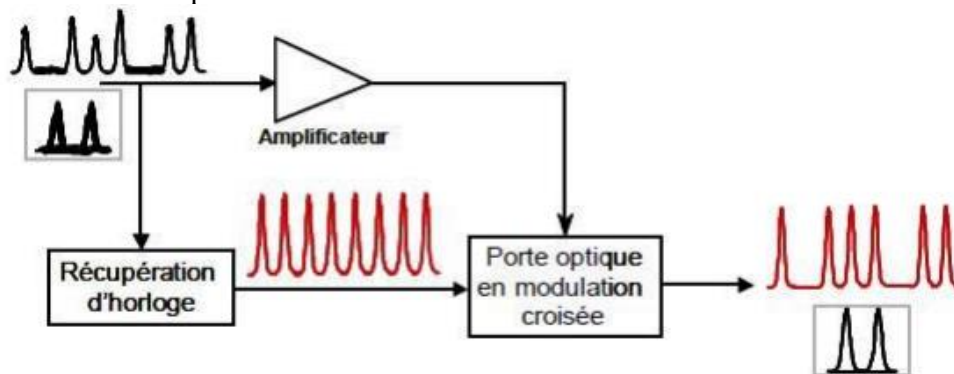


Figure I.12 : Synoptique de la régénération 3R (Retiming Reshaping Repeat) [11].

I.6 Conclusion

La fibre optique constitue aujourd'hui le pilier des réseaux de télécommunications modernes, grâce à ses performances largement supérieures à celles des câbles en cuivre. Sa capacité à transmettre de très hauts débits sur de longues distances, tout en offrant une excellente immunité aux interférences électromagnétiques et une faible atténuation, en fait la solution privilégiée pour les infrastructures numériques de nouvelle génération.

Ce chapitre a permis d'acquérir une vision globale des principes physiques et technologiques régissant la transmission optique, depuis la structure de la fibre jusqu'aux techniques de compensation des pertes. Ces connaissances fondamentales sont essentielles pour comprendre les architectures d'accès en fibre optique, telles que les réseaux FTTH (Fiber To The Home), qui visent à étendre les performances de la fibre jusqu'à l'utilisateur final.

Le chapitre suivant s'appuiera sur ces acquis pour présenter en détail les réseaux FTTH : leur conception, leur architecture, les équipements utilisés et les défis liés à leur déploiement à grande échelle dans les environnements urbains et ruraux.

Chapitre II

Présentation de la Technologie FTTH

II.1 Introduction

Les moyens de télécommunications ne cessent d'accroître à l'échelle exponentielle depuis le début du vingtième siècle, avec l'apparition des nouveaux services liés au développement du multimédia, un besoin d'un haut débit de transmission d'informations a vu le jour : la fibre optique est enfin utilisée via la technologie FTTH pour connecter les particuliers dans les années à venir, ce support de transmission apportera un changement radical dans l'environnement des télécommunications à travers le monde.

FTTH (Fiber To The Home, Fibre jusqu'au domicile) : l'abonné final est raccordé jusqu'à son domicile par une fibre optique unique qui lui est dédiée. Cette technologie permet l'accès à Internet, à la Télévision, à la Téléphonie avec des débits bien supérieurs à ceux que permet actuellement l'ADSL par exemple.

Ce chapitre fournira un aperçu de la technologie du réseau d'accès par fibre optique des abonnés (Fiber to the Home ou FTTH).

II.2 La technologie FTTH

I.2.1 Présentation

Le FTTH correspond au déploiement de la fibre optique depuis le nœud de raccordement optique (localisation des équipements de transmission de l'opérateur) jusqu'au domicile ou aux locaux professionnels.

Le FTTH vous permet ainsi de bénéficier des avantages de la technologie fibre optique sur tout le réseau jusqu'à l'utilisateur. Il diffère des autres types de déploiements qui utilisent la fibre en conjonction avec des réseaux câblés ou en cuivre ; des vitesses allant jusqu'à 2,5 Gbit/s en aval et 1,2 Gbit/s en amont peuvent désormais être atteintes sur la même fibre et peuvent être partagées entre 64 clients.

Le déploiement de la partie terminale du réseau (boucle locale) signifie :

- ✓ Dans la rue (déploiement horizontal).
- ✓ Puis dans les bâtiments (déploiement vertical dans les bâtiments collectifs)
- ✓ Entrée définitive dans le logement (connexion définitive).

II.2.2 Principe du FTTH

Le FTTH (Fiber To The Home) est une technologie de réseau d'accès optique qui consiste à amener la fibre optique directement jusqu'au local ou au logement de l'abonné, sans rupture de support entre le Nœud de Raccordement Optique (NRO) et le Point Terminal Optique (PTO). Cette architecture garantit un débit élevé, une faible atténuation du signal et une grande évolutivité pour répondre aux besoins futurs en bande passante.

Le NRO, est le point névralgique du réseau FTTH. Il regroupe l'ensemble des équipements actifs nécessaires à la conversion et à l'acheminement du signal optique vers le réseau de distribution. Dans le NRO, chaque fibre est organisée et distribuée via un répartiteur

optique (ODF, Optical Distribution Frame), qui facilite l'interconnexion, la gestion et la maintenance du réseau.

Depuis le NRO, la fibre optique est déployée le long du réseau grâce à une infrastructure hiérarchisée :

Réseau de transport : relie le NRO aux zones desservies, sur des distances plus longues, avec des câbles de grande capacité.

Sous-Répartiteur Optique (SRO) : situé en aval du NRO, le SRO constitue un point intermédiaire de redistribution du signal. Il permet de diviser le faisceau principal en câbles secondaires, adaptés à la topologie locale et à la densité des zones résidentielles.



Figure II.1 : Structure d'un réseau FTTH.

Au plus proche des abonnés, le réseau de branchement permet la connexion finale vers chaque foyer ou immeuble. Les PBO sont installés en domaine public (sur un poteau, en façade ou dans un coffret de rue) ou à l'intérieur des immeubles pour assurer le raccordement terminal. Ces points servent d'interface entre le réseau de distribution et le câble de branchement individuel.

Les câbles à fibres optiques sont connectés entre eux grâce à des boîtes de jonction, où chaque fibre est fusionnée pour garantir la continuité optique et limiter les pertes. Ces boîtes servent également à répartir un câble principal en plusieurs tronçons secondaires, ce qui optimise le maillage du réseau. Lors de la conception, les opérateurs prévoient systématiquement une capacité excédentaire de fibres pour pouvoir raccorder de nouveaux foyers sans devoir réengager de lourds travaux de génie civil.

Le déploiement physique de la fibre peut s'appuyer sur :

Des infrastructures souterraines, composées de canalisations installées dans des tranchées, ponctuées de chambres de tirage pour faciliter l'installation, les opérations de soudure et la maintenance.

Des infrastructures aériennes, utilisant une série de poteaux et de points d'ancrage permettant de supporter les câbles et de franchir facilement des obstacles naturels ou urbains.

Immeubles collectifs : la fibre arrive à la base du bâtiment via une conduite d'alimentation, puis est acheminée verticalement grâce à des colonnes montantes qui distribuent la fibre jusqu'à chaque étage. À chaque palier, un PBO permet le raccordement du logement. À l'intérieur du logement, le câble est terminé par un Point Terminal Optique (PTO), où l'équipement de l'utilisateur (modem, ONT) est branché.

Maisons individuelles et petits immeubles : la fibre est reliée directement à un PBO situé dans l'espace public (façade ou poteau) qui dessert un ou plusieurs pavillons. Le raccordement final se fait ensuite jusqu'au PTO à l'intérieur du domicile. [12].

II.3 Les avantages du FTTH

Les avantages des réseaux FTTH comprennent :

II.3.1 Vitesse et performance

La fibre FTTH offre des vitesses de connexion inégalées par rapport aux technologies précédentes. Avec des débits allant jusqu'à 1 Gbit/s, bien supérieures à celles des connexions cuivre comme l'ADSL ou le VDSL.

II.3.2 Fiabilité et stabilité

Contrairement aux connexions ADSL ou VDSL, qui peuvent être affectées par des facteurs externes tels que la distance d'un commutateur téléphonique ou des interférences électromagnétiques, la technologie FTTH offre une connexion stable quels que soient ces facteurs. Cela se traduit par une qualité de service constante, ce qui est essentiel pour les entreprises qui dépendent de la connectivité Internet pour leurs opérations quotidiennes.

II.3.3 Latence réduite

La faible latence dans les réseaux FTTH permet une réponse instantanée des applications et des services en ligne, tels que les jeux en ligne, les appels vidéo en temps réel et les services de voix sur IP.

II.3.4 Fiabilité et faible atténuation

Les fibres optiques sont moins sujettes aux interférences électromagnétiques et présentent des pertes moindres sur de longues distances par rapport aux câbles en cuivre.

II.3.5 Scalabilité

Elle se distingue par sa capacité à évoluer pour supporter des vitesses de transmission encore plus élevées avec de futurs développements technologiques sans nécessiter de remplacement de l'infrastructure.

II.4 Architecture du réseau d'accès optique FTTH

L'architecture du réseau fait référence à la conception d'un réseau de communication et fournit un cadre pour la spécification du réseau, des composants physiques aux services.

Le réseau d'accès est une partie du réseau de communication qui se connecte directement aux utilisateurs finaux. Afin de spécifier l'interfonctionnement des infrastructures passives et actives, il est important de faire une distinction claire entre les topologies utilisées

pour le déploiement des fibres (l'infrastructure passive) et les technologies utilisées pour le transport des données sur les fibres (l'équipement actif).

Deux types de topologies physiques permettent d'acheminer la fibre jusqu'au client final :

- **L'architecture Ethernet point-à-point (P2P)** : pour laquelle une fibre optique par abonné est déployée du NRO jusqu'au foyer de l'utilisateur.
- **L'architecture point-multipoint (P2MP) ou PON (Passive Optical Network)** : basée sur différents standards (GPON, EPON) et pour laquelle une fibre optique peut desservir plusieurs abonnés.

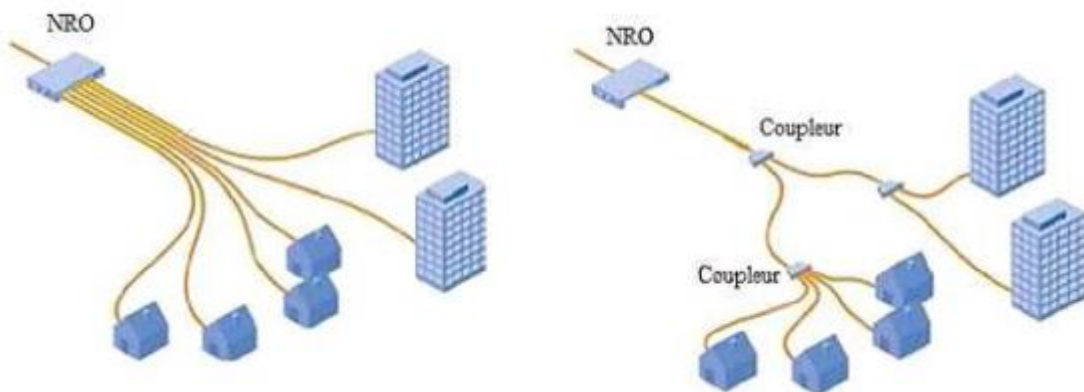


Figure II.2 : Architecture des réseaux FTTH.

Les deux topologies les plus utilisées sont le point-multipoint, souvent combiné avec une technologie de réseau optique passif (PON), et point-à-point, qui utilise généralement des technologies de transmission Ethernet.

II.4.1 L'architecture point à point (p2p)

Cette architecture est la plus simple à mettre en œuvre parmi les Topologies physiques du réseau d'accès optiques, elle consiste à avoir un lien physique en Fibre optique directement entre le central et l'abonné. Son déploiement revient plus cher. Dans cette architecture, chaque abonné sera raccordé au répartiteur optique du réseau le Plus proche, avec une fibre dédiée (point à point). Cette architecture permet une étanchéité absolue entre les lignes des différents abonnés, chaque fibre étant dédiée à un abonné, il y a autant de fibres que d'abonnés.

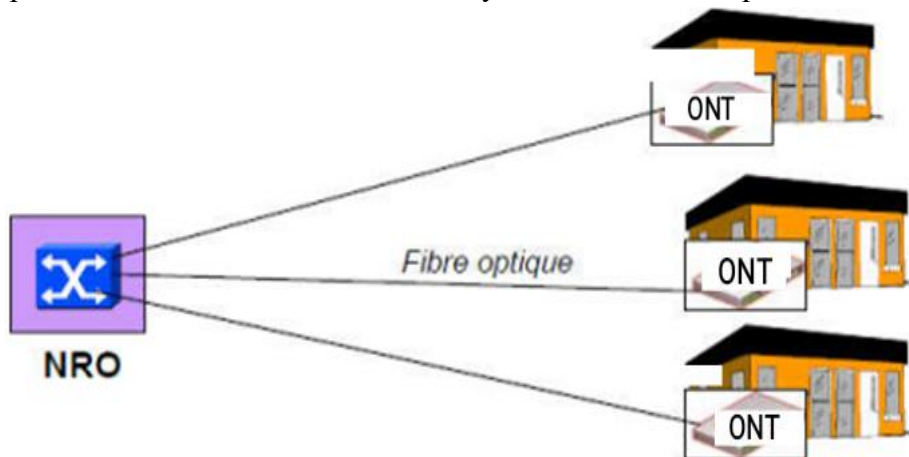


Figure II.3 : Les architectures point-to-point [13].

On utilise différents protocoles pour le transport des données, souvent c'est Ethernet qui est choisi. Ces solutions sont alors dénommées Ethernet P2P ou Ethernet Direct Fiber. Elles permettent des débits de 10Gb/s. Pour être commercialisé, les débits sont limités à des valeurs inférieures, par exemple 100Mb/s symétriques [5].

II.4.2 L'architecture point à multipoint ou PON (réseau optique passif)

Un réseau point-à-multipoint (P2M) connu aussi sous le nom de PON (Passive Optical Network ou Réseau optique passif), le terme de passif s'appliquant au splitter qui ne comporte aucun élément électronique. Dans cette architecture, une fibre unique part du central optique dans le réseau est desservie plusieurs habitations, sur lesquelles sont raccordées à cette fibre au niveau d'un équipement passif (coupleur ou splitter) placé à proximité de la zone à desservir. Chaque site reçoit toutes les informations envoyées par l'équipement central OLT (Optical Link Terminal) ; et les reçoivent par l'équipement récepteur ONT (Optical Network Termination) de chaque abonné, et assure la fonction du filtrage : chacun des ONT et OLT n'exploitent que les données qui concerne l'utilisateur qui y est raccordé [5].

Les architectures PON peuvent être organisées en :

- A -Étoile** (un coupleur en sortie de chaque port PON de l'OLT dessert n ONT),
- B -Arbre** (en cascade des coupleurs, un coupleur pouvant desservir plusieurs sous-branches),
- C -Bus** (sérialisation des coupleurs).

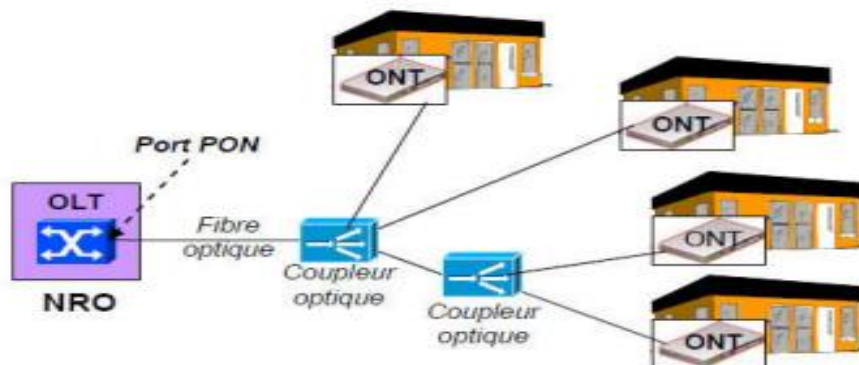


Figure II.4 : Architecture Point-to-Multipoint (PON).

C'est l'architecture en arbre qui est la plus souvent déployée, avec deux niveaux de coupleurs optiques (par exemple, un coupleur situé au NRO ou dans un sous-répartiteur optique, et un deuxième coupleur situé au plus près des abonnés) [14].

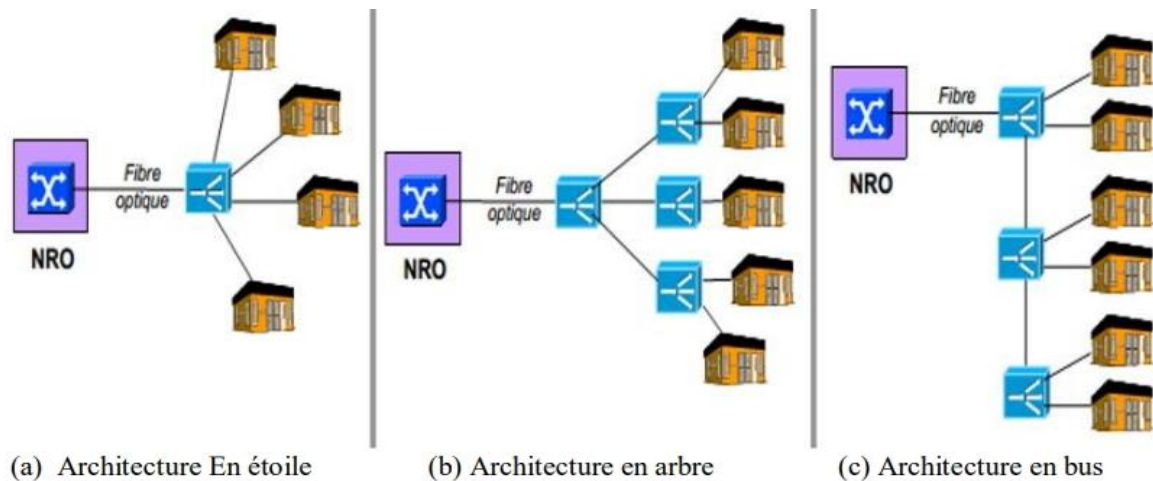


Figure II.5 : Différents topologies PON.

II.4.3 Comparaison entre les deux architectures P2P et PON

Dans un réseau PON, Le déploiement de la fibre se compose :

- **Déploiement** : déploiement peut couvrir une plus grande zone géographique.
- **Fibrage horizontal** : chaque opérateur pose une fibre pour, au maximum, 64 voire 192 clients.
- **Fibrage vertical** : il faut poser une fibre par résident de l'immeuble.
- **Transition** : La transition entre les fibres des résidents et des différentes fibres des immeubles s'effectue au moyen d'un splitter passif [15].

Tandis que, Le déploiement d'un réseau FTTH P2P (point-à-point) se fait en utilisant une seule fibre optique par abonné et par FAI. Chaque abonné dispose d'une fibre optique bidirectionnelle qui lui est propre le reliant directement au nœud de raccordement optique de l'opérateur. Le fibrage horizontal (dans les rues) et le fibrage vertical (dans l'immeuble) impliquent au minimum, la pose d'une fibre pour chaque logement [3].

II.4.4 Critères De Choix

Lorsqu'un fournisseur de télécommunications choisit une architecture de fibre, de nombreux facteurs doivent être pris en compte tel que :

❖ La densité d'abonnés

- La densité d'abonnés est un facteur économique important pour les fournisseurs lors du choix de l'architecture appropriée.
- Dans les régions à densité élevée d'abonnés, une architecture PON est plus économique grâce aux distances plus courtes entre les lieux. Cependant, chaque ajout d'OLT entraîne des coûts élevés, ce qui rend la connexion des abonnés supplémentaires très coûteuse.

❖ La bande passante disponible

- Les prochains réseaux d'accès devront fournir des débits JUSQU'À 300 Mbit/s par client pour répondre aux besoins de la TVHD, de la navigation Internet et des appels vidéo. Toutes les architectures FTTH actuelles sont capables de fournir de tels débits.

❖ La portée du réseau

- En P2P, le réseau doit couvrir jusqu'à 10 km, tandis que les normes PON incluent des distances de 10 et 20 km.

❖ Le coût

- Le coût global de l'infrastructure varie en fonction de divers éléments tels que les tarifs des matériaux, la disponibilité des conduits, la topographie du terrain et les coûts de main-d'œuvre locaux [3].

II.5 Standards de réseau FTTH

L'architecture PON se décline ensuite en plusieurs catégories :

II.5.1 GPON (Gigabit Passive Optical Network)

Les réseaux GPON à connexion Gigabit, ou G-PON (réseau optique passif compatible Gigabit) est un protocole de 2ème génération des PON édité par l'ITU-T comme norme de recommandation G.984, utilisent des protocoles basés sur IP et sont reconnus pour leur incroyable flexibilité vis-à-vis des types de trafic et des applications « Triple Play » (Internet, téléphonie, télévision). La méthode d'encapsulation G-PON générique est capable de combiner des données IP, Ethernet, VoIP et de bien d'autres types encore.

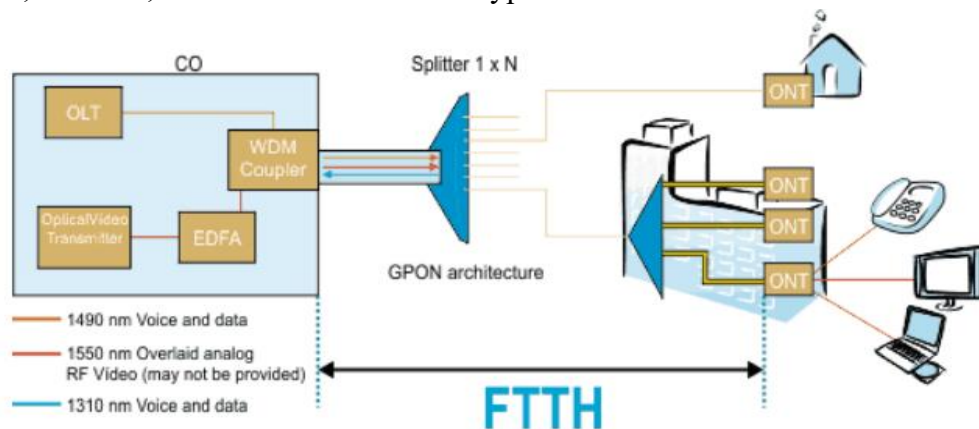


Figure II.6 : Architecture du réseau d'accès GPON FTTH [15].

Standard plus récent, utilisant l'ATM ou Ethernet comme protocoles de transport. Il offre un débit maximal de 2,5 Gb/s dans le sens descendants (longueur d'onde 1490 nanomètre) et 1,25 Gb/s dans le sens remontant (longueur d'onde 1310 nanomètres) par port. De plus, GPON permet une plus grande distance de déploiement jusqu'à 60 km, avec 20 km maximum entre les ONT. Enfin, le GPON permet jusqu'à 64 lignes sortantes d'un coupleur optique (splitter) [3].

➤ Les Avantages

- La structure est passive car elle est à base de coupleurs optiques.
- Le génie civil est optimisé et le coût réduit.
- Infrastructure partiellement partagée (économie sur la fibre).
- L'architecture est favorable à la diffusion
- L'OLT est partagé (un duplexeur au central pour 32 clients).

II.5.2 EPON (Ethernet Passive Optical Network)

Ce standard utilise le protocole Ethernet comme protocole de transport. Il présente un débit symétrique maximal de 1,25 Gb/s par port, partagé pour un maximum de 64 abonnés, et disposant d'une portée d'environ 20 km, dans ce réseau une longueur d'onde est utilisée par sens de transmission et peut atteindre 32 abonnés par OLT [15].

La principale différence avec GPON concerne l'approche architecturale. La technologie GPON fournit la technologie ATM pour la voix, la technologie Ethernet pour les données et l'encapsulation privée pour d'autres services. EPON utilise IP pour transmettre des données, de la voix et de la vidéo.

II.5.3 X-GPON

La version 10G du GPON se nomme XG-PON. Ce nouveau protocole caractérisé par un débit descendant de 10 Gbit/s et un débit montant de 2,5 Gbit/s. Le plan d'allocation en longueur d'onde de ces transmissions a également été défini : les signaux descendants devront être émis en 1575 et 1580 nm et les signaux montants entre 1260 et 1280nm [16].

II.5.4 NG-PON2

Le NG-PON2 est normalisé par l'UIT en 2014 et 2016 (G.989.1 et G.989.2), il permet un débit de 40 Gbit/s (voir jusqu'à 80 Gbit/s) dans le sens descendant et 10 Gbit/s dans le sens montant. Il possède 3 types de débit canal : basic : 10/2.5 Gbit/s ou optionnel 10/10 Gbit/s et 2.5/2.5 Gbit/s. NG-PON2 est basé sur les technologies TDM-PON et WDM-PON (attribution de longueur d'onde aux utilisateurs) [16].

II.6 Composants du réseau FTTH

Le réseau FTTH (Fiber To The Home) repose sur une architecture optique permettant de fournir un accès très haut débit directement aux utilisateurs. Il est composé de plusieurs éléments essentiels qui assurent la transmission, la distribution et la réception des données sous forme de signaux lumineux. Ces composants incluent des équipements actifs et passifs, tels que les terminaux optiques (OLT et ONT), la fibre optique, les coupleurs optiques (splitters), ainsi que divers éléments de raccordement. L'ensemble de ces composants joue un rôle clé dans la performance et la qualité du service offert aux abonnés.

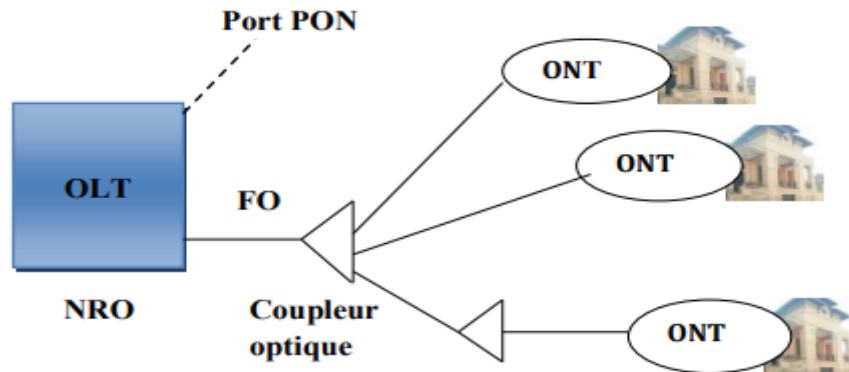


Figure II.7 : Différents éléments constitutifs d'un réseau FTTH.

II.6.1 Ligne optique terminal OLT (Optical Line Terminal)

OLT est l'équipement maître d'accès optique pour des clients connectés au FTTx, un lieu de collecte permet de distribuer des services tel que : l'internet, la téléphonie et la vidéo, cet équipement est actif, placé au central, envoie et reçoit des signaux lumineux porteurs des données.

Le transmetteur optique est composé d'un module dont l'émetteur est généralement une diode LASER.

Un récepteur qui permet d'adapter le seuil de décision de la photodiode en fonction des paquets de données reçues. OLT doit être conformes à la norme ITU [17].

II.6.2 La fibre optique

La fibre optique est l'élément central du réseau FTTH (Fiber To The Home), est un support de transmission pour faire circuler une intensité de lumière entre deux points distants (quelques kilomètres).

Les fibres optiques sont des « fils » de verre ou de plastique transparent pouvant transmettre des ondes sur de longues distances avec une perte minimale. La fibre optique offre un débit d'informations nettement supérieur à celui des câbles coaxiaux et supporte un réseau large bande Par lequel peuvent transiter aussi bien la télévision, le téléphone, la visioconférence ou les données informatiques.

II.6.3 Coupleur optique (Splitter)

Les coupleurs sont des éléments passifs qui permettent de partager le signal optique vers n ONT dans le sens descendant et d'agrèger n signaux optiques en un seul signal dans le sens montant. On ne peut varier de 2 à 64 dans un réseau PON. Une configuration classique est d'utiliser deux niveaux de coupleurs 1 vers 4 ou 1 vers 8 ; c'est-à-dire que le signal est divisé deux fois en 4 ou 8 branches.

II.6.4 ONT (Optical Network Terminal)

L'ONT peut-être considéré comme un modem optique auquel le client vient connecter sa passerelle d'accès au haut débit. C'est un élément terminal du réseau optique. L'ONU désigne un élément générique terminal du réseau d'accès optique FTTx. L'ONT se compose d'un module, d'un émetteur optique à base d'une diode LASER et un photorécepteur.

L'ONT est une connexion directe à un OLT, où les périphériques ONT diffusent sur la même longueur d'onde pour des raisons de coût et de gestion de l'équipement.

II.7 Défis et Limitations du FTTH

Le FTTH (Fiber To The Home) présente certaines limitations techniques qui peuvent impacter la performance et le déploiement du réseau. Parmi ces défis, on retrouve principalement l'atténuation et la dispersion.

II.7.1 L'atténuation

Bien que très performantes, les fibres optiques subissent des atténuations (pertes) lors de la propagation du signal. Ces atténuations se mesurent en dB/km elles varient en fonction de la longueur d'onde et correspondent à des pertes en lignes (atténuation linéique) dues à différents phénomènes de propagation. Ces atténuations provoquent des limitations de la puissance transmise en ligne ce qui engendre une réduction de la bande passante totale et des répercussions sur la réception.

II.7.2 La dispersion

La dispersion en fibre optique conduit à un élargissement des impulsions, ce qui limite la bande passante.

Deux types existent :

- **Chromatique** (liée à la longueur d'onde, nulle à 1310 nm).
 - **Modale** (présente en fibre multimode, absente en monomode).
- Les pertes optiques sont compensées par des amplificateurs : à semi-conducteur ou à fibre dopée en erbium (EDFA), qui amplifient le signal à l'aide d'un laser de pompage.

II.8 Conclusion

La technologie FTTH (Fiber To The Home) constitue aujourd'hui l'un des piliers majeurs de l'évolution des réseaux de télécommunications. En assurant un raccordement direct et dédié entre l'abonné final et le cœur du réseau via la fibre optique, elle permet de répondre efficacement aux besoins croissants en bande passante, en qualité de service et en stabilité de connexion.

Ce chapitre a permis de dresser un panorama complet de cette technologie, en mettant en évidence son principe de fonctionnement, ses différentes architectures (point-à-point et point-à-multipoint), ainsi que les standards internationaux qui la régissent, tels que GPON, EPON ou NG-PON2. Nous avons également analysé les critères de choix entre les architectures en fonction de la densité d'abonnés, de la portée du réseau, du coût d'investissement et des performances attendues.

En outre, les composants essentiels à la mise en œuvre d'un réseau FTTH ont été étudiés, notamment les équipements actifs (OLT et ONT), les éléments passifs (fibre optique, coupleurs, boîtiers de raccordement) ainsi que les défis techniques liés à l'atténuation et à la dispersion. Tous ces éléments conditionnent la fiabilité et l'efficacité du réseau, mais ouvrent également la voie à des solutions évolutives et pérennes face aux besoins futurs.

Dans le chapitre suivant, nous aborderons la phase pratique de cette étude à travers la conception et la simulation d'un réseau FTTH. Cette simulation, réalisée à l'aide d'un outil spécialisé, permettra de valider les choix technologiques présentés dans ce chapitre, d'évaluer les performances du réseau en termes de débits, de pertes et de qualité de transmission, et de proposer une configuration optimale adaptée au contexte ciblé. Elle constituera une étape essentielle dans la démonstration de la faisabilité et de l'efficacité d'un déploiement FTTH pour les très hauts débits.

Chapitre III

Résultats de Simulation et Analyse Comparative

III.1 Introduction

Dans un contexte marqué par l'accroissement exponentiel des besoins en bande passante, notamment pour les applications exigeantes telles que la réalité augmentée, la télémédecine ou les services à très haut débit, les réseaux optiques WDM-PON (Wavelength Division Multiplexing – Passive Optical Network) apparaissent comme une solution d'avenir. Ces réseaux, grâce à la multiplexation en longueurs d'onde, permettent une distribution efficace de la bande passante, tout en assurant une isolation optimale entre les utilisateurs.

Ce chapitre constitue une contribution originale et approfondie à l'analyse comparative de deux topologies WDM-PON : la topologie en étoile et la topologie en arbre hiérarchisé. À travers des simulations rigoureuses réalisées sous OptiSystem, outil reconnu dans le domaine de la simulation optique, nous avons exploré les performances de ces deux architectures en prenant en compte trois paramètres clés : la puissance d'émission, la distance de transmission et le débit binaire.

L'approche méthodique adoptée dans ce travail nous a permis non seulement d'évaluer la qualité du signal transmis à travers des indicateurs comme le facteur de qualité (Q-factor), le taux d'erreur binaire (BER) et le diagramme de l'œil, mais aussi de dégager des recommandations concrètes pour l'optimisation des réseaux WDM-PON selon les cas d'usage.

Ce chapitre met donc en lumière, de façon comparative, les avantages et les limites de chaque topologie, en s'appuyant sur des résultats quantitatifs précis, tout en ouvrant des perspectives d'évolution pour les futures générations de réseaux d'accès optiques.

III.2 Paramètres de qualité d'une liaison optique

III.2.1 Le facteur de qualité en amplitude ou facteur Q

C'est un paramètre permettant de quantifier et d'évaluer la qualité d'un signal optique. Il est obtenu à partir des statistiques du bruit des niveaux (1) et (0) du signal à détecter. Le facteur Q permet d'estimer le taux d'erreur binaire sans avoir à compter les erreurs, mais en considérant tout simplement l'amplitude moyenne des bits « 1 » et « 0 » et la valeur de leur écart type et, ce facteur est défini par :

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\delta_1 - \delta_0} \quad (1)$$

I_1 et I_0 sont les tensions moyennes des symboles « 1 » et « 0 »

δ_1 et δ_0 sont les variances des probabilités des symboles « 1 » et « 0 »

III.2.2 Le taux d'erreurs binaire

Le taux d'erreur binaire est défini comme le pourcentage de bits qui ont des erreurs par rapport au nombre total de bits reçus. Il se définit comme suit :

$$BER = \frac{\text{Nombre de bits erronés}}{\text{Nombre de bits transmis}} \quad (2)$$

Un système est généralement qualifié de bonne qualité en télécom optique si son taux d'erreur binaire BER est inférieur à 10^{-9} ou à 10^{-12} suivant les systèmes.

III.2.3 Le diagramme de l'œil

Le diagramme de l'œil représente la superposition synchrone de tous les symboles binaires de la séquence transmise, obtenue par observation sur un oscilloscope, pour estimer la qualité d'un signal, plus le signal est de mauvaise qualité, plus le diagramme de l'œil est fermé, plus le facteur de qualité est faible, plus la détection du signal sans erreur est difficile.

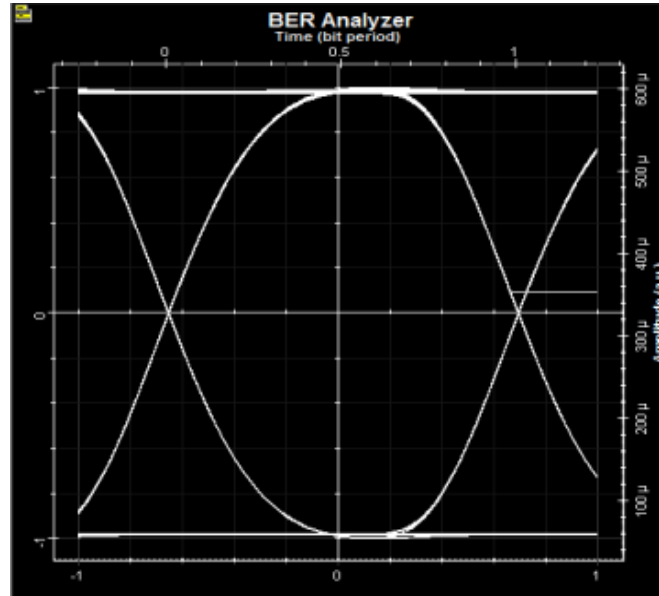


Figure III.1 : Le diagramme de l'œil

III.3 Scénario 1 : Analyse des Performances – Topologie en Étoile

Le premier scénario illustre une architecture WDM-PON (Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network) simple et directe, avec une topologie en Étoile, implémentée à l'aide du logiciel OptiSystem. Ici, un démultiplexeur WDM 1x4 est utilisé pour diviser le signal optique multiplexé directement en quatre longueurs d'onde, chacune étant envoyée à un utilisateur final. Ce type de réseau est très efficace dans une application où l'on souhaite offrir une bande passante dédiée élevée à chaque utilisateur, en utilisant différentes longueurs d'onde de la même fibre.

La figure III.2 présente Scénario 1 en étoile pour l'architecture (WDM-PON).

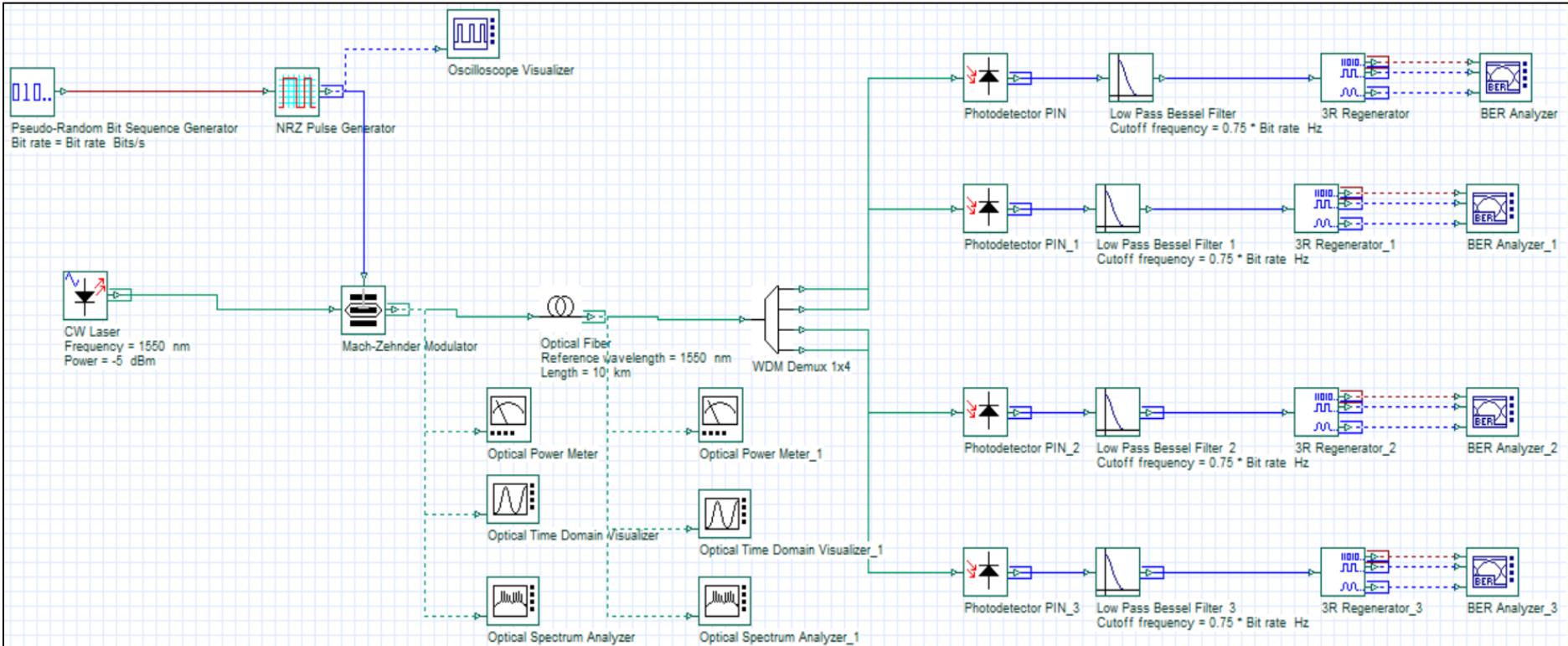


Figure III.2 : Scénario 1 WDM-PON

Ce scénario est divisé en trois parties :

A. Système de transmission

- **Pseudo-Random Bit Sequence Generator Ou User Defined Bit Sequence Generator:** Génère le flux de bits d'entrée.
- **NRZ Pulse Generator :** Génère des impulsions modulées au format Non-Return to Zéro (NRZ).
- **Laser CW :** Source optique continue à une longueur d'onde de 1550 nm et une puissance à -5 dBm.
- **Mach-Zehnder Modulator :** Permet la modulation du signal optique par le flux binaire.

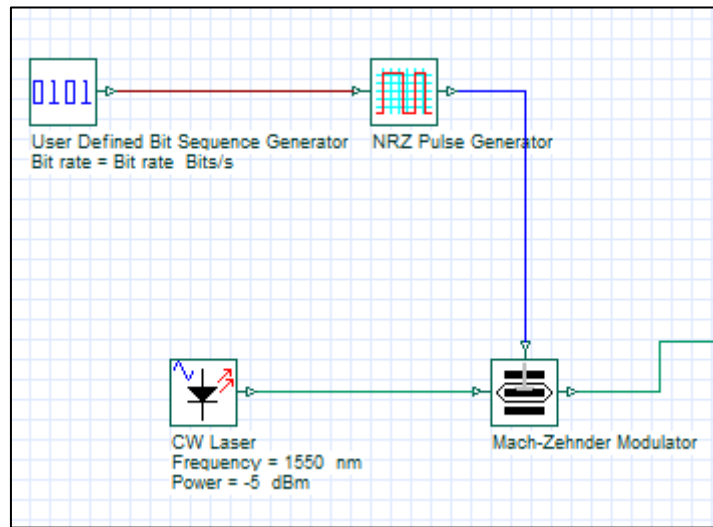


Figure III.3 : Partie d'émission

B. Canal de transmission

- **Optical Fiber :** Simulation de la transmission sur une fibre optique monomode de longueur 10 km avec une longueur d'onde à 1550 nm.

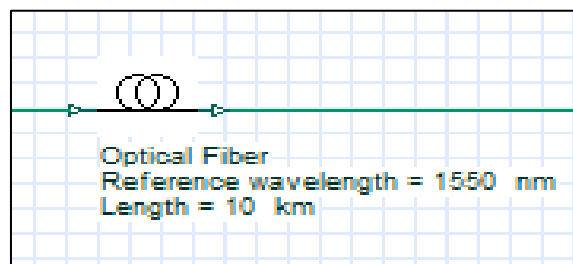


Figure III.4 : Partie de transmission

C. Système de réception

- **WDM Démultiplexeur (1x4) :** Séparation des différentes longueurs d'onde en fonction des besoins de l'architecture.
- **Photodétecteur PIN :** Conversion du signal optique reçu en signal électrique.
- **Filtre passe-bas Bessel :** Filtrage du bruit haute fréquence du signal électrique.
- **Régénérateur 3R :** Régénération du signal (Reshape, Retime, Regenerate) avant analyse.

- **BER Analyzer** : Mesurer les performances de transmission (Taux d'Erreur Binaire, facteur de qualité) et pour visualiser le diagramme de l'œil.

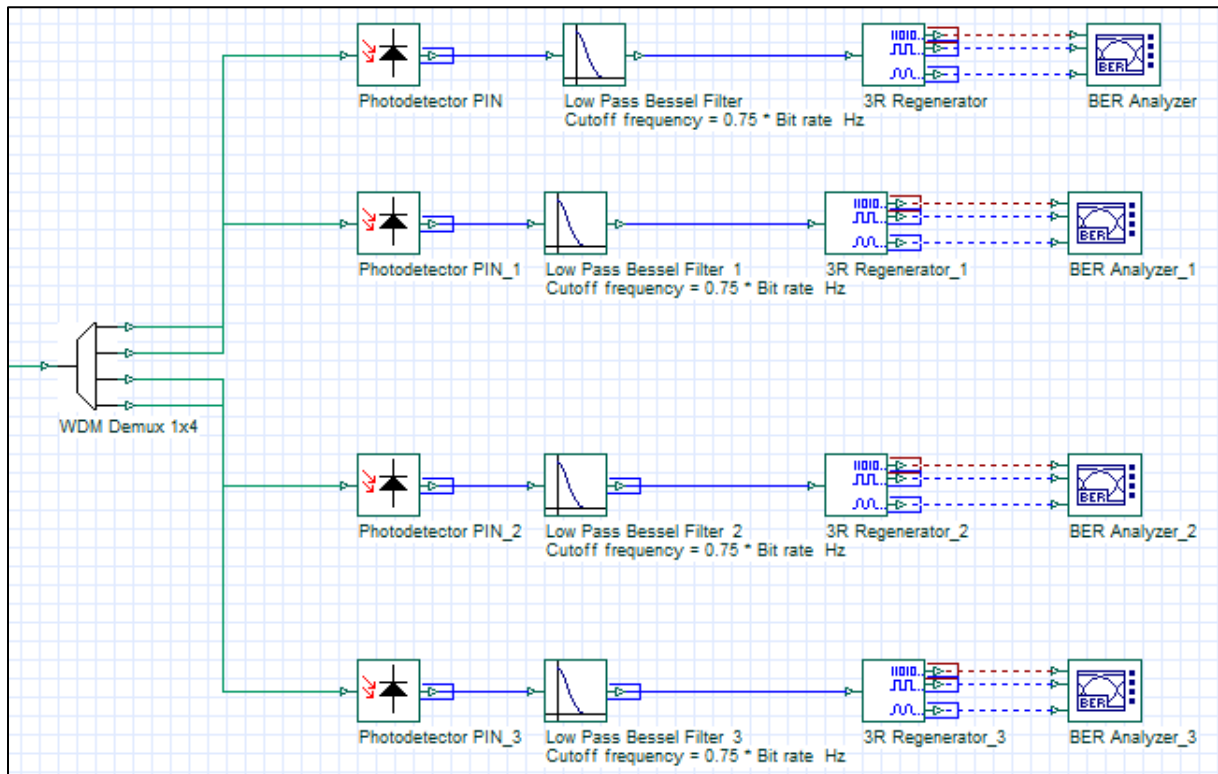


Figure III.5 : Partie de réception

III.3.1 Effet de la puissance d'émission

Dans cette partie, nous allons faire un changement de puissance dans l'intervalle -7 à 5 dBm avec un pas de 2 dBm avec une distance 10 km et une longueur d'onde 1550 nm.

Le tableau suivant représente les résultats de Q-factor (facteur de qualité) et BER (Taux D'erreur Binaire) pour les quatre BER Analyzer :

Puissance (dBm)	BER Analyzer		BER Analyzer 1		BER Analyzer 2		BER Analyzer 3	
	Q-factor	BER	Q-factor	BER	Q-factor	BER	Q-factor	BER
-7	10.3476	1.64673e-024	10.3023	2.65199e-025	10.6637	5.74529e-027	10.511	2.95125e-026
-5	10.813	1.09814e-027	10.8031	1.22733e-027	10.9931	1.52041e-028	10.951	2.42052e-028
-3	11.0539	7.55142e-029	11.0626	6.86595e-029	11.1561	2.41996e-029	11.1699	2.06341e-029
-1	11.1733	1.96315e-029	11.1897	1.63406e-029	11.2356	9.7743e-030	11.271	6.51798e-030
1	11.2347	9.78577e-030	11.2529	7.96672e-030	11.2763	6.13229e-030	11.3165	3.8683e-030
3	11.2699	6.56315e-030	11.2872	5.39104e-030	11.2998	4.6851e-030	11.3379	3.02881e-030
5	11.294	4.98932e-030	11.3094	4.187e-030	11.3165	3.8672e-030	11.35	2.63511e-030

Tableau III.1 : Variation du Q-factor et du BER en fonction de la puissance d'émission

Le tableau III.1 présente l'évolution du facteur de qualité (Q-factor) et du taux d'erreur binaire (BER) en fonction de la puissance d'émission, dans le cadre de la topologie WDM-PON en étoile. Pour cette analyse, la puissance a été modulée de -7 dBm à 5 dBm par pas de 2 dBm, avec une distance de transmission fixée à 10 km et une longueur d'onde de 1550 nm. Les résultats ont été mesurés à l'aide de quatre analyseurs de BER, correspondant à quatre canaux utilisateurs distincts.

L'analyse des résultats met en évidence une amélioration progressive de la qualité du signal à mesure que la puissance d'émission augmente. En effet, le Q-factor, qui traduit la clarté et la distinction entre les niveaux logiques du signal reçu, augmente avec la puissance, atteignant des valeurs supérieures à 11 à partir de -3 dBm. En parallèle, le taux d'erreur binaire diminue de manière significative, atteignant des valeurs de l'ordre de 10^{-30} pour les puissances élevées. Ces performances indiquent une excellente qualité de transmission et une très faible probabilité d'erreurs.

L'ouverture du diagramme de l'œil, observée en complément dans les figures associées, confirme cette tendance : à faibles puissances, le signal est plus bruité et l'œil est partiellement fermé ; à partir de -3 dBm, le signal devient stable, l'œil bien ouvert, et la détection sans erreur est facilitée. Ainsi, on peut conclure que le seuil optimal de puissance d'émission se situe entre -3 dBm et 5 dBm pour cette configuration, garantissant une transmission fiable et de haute qualité sur une fibre de 10 km.

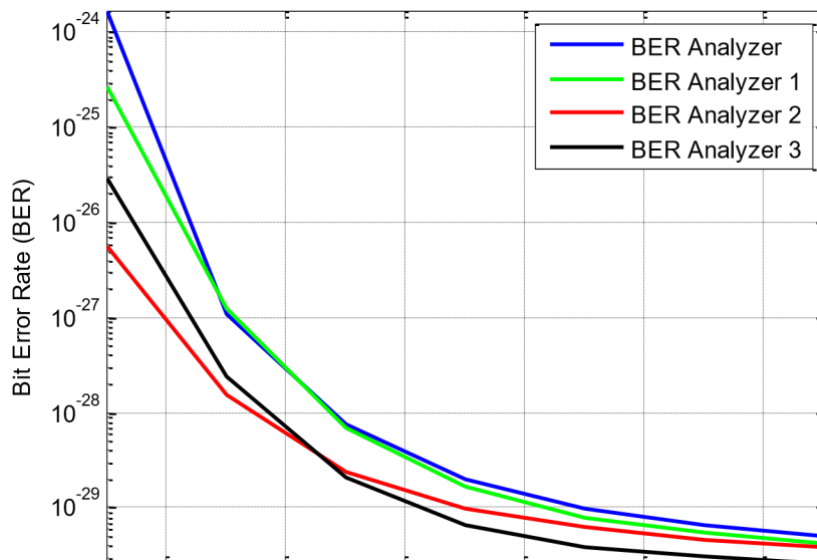


Figure III.6 : Courbe du BER en fonction de la puissance

Les figures III.6 et III.7 illustrent respectivement l'évolution du taux d'erreur binaire (BER) et du facteur de qualité (Q-factor) en fonction de la puissance d'émission pour la topologie WDM-PON en étoile. Ces courbes permettent de visualiser de manière synthétique la relation directe entre la puissance optique injectée et la performance du système.

La figure III.6 montre une décroissance exponentielle du BER lorsque la puissance augmente. À des puissances faibles (autour de -7 dBm), le BER reste relativement élevé, indiquant une transmission bruitée et sujette à des erreurs. Cependant, à partir de -3 dBm, le taux d'erreur devient extrêmement faible (de l'ordre de 10^{-30}), traduisant une excellente fiabilité de transmission. Cette amélioration est due à une meilleure détection des niveaux logiques du signal à la réception.

La figure III.7 confirme cette tendance en présentant une courbe ascendante du Q-factor. Celui-ci augmente de manière régulière avec la puissance, atteignant des valeurs supérieures à 11 pour des puissances entre -3 dBm et 5 dBm, ce qui reflète une très bonne qualité du signal optique. Ces résultats confirment l'existence d'un seuil optimal de puissance au-delà duquel le système fonctionne avec un niveau de performance maximal, assurant une transmission stable, précise et adaptée aux besoins en haut débit.

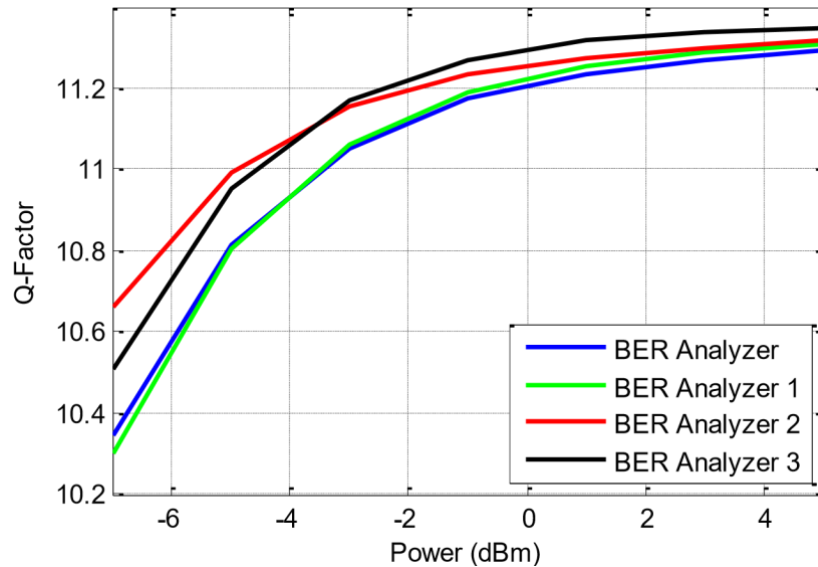


Figure III.7 : Courbe du Q-Factor en fonction de la puissance

Les figures III.8 et III.9 présentent les diagrammes de l'œil obtenus pour différentes puissances d'émission dans le cadre du scénario WDM-PON en étoile. Ces représentations visuelles sont des outils fondamentaux pour évaluer la qualité du signal reçu, notamment en ce qui concerne la clarté des transitions binaires et la présence de bruit ou de distorsion.

À faible puissance d'émission (par exemple, -7 dBm), le diagramme de l'œil apparaît partiellement fermé, traduisant une superposition floue des niveaux logiques « 0 » et « 1 ». Cette fermeture de l'œil est synonyme d'une dégradation de la qualité du signal, rendant la détection des bits plus sujette aux erreurs.

À mesure que la puissance augmente, les figures montrent une ouverture progressive et nette de l'œil. À partir de -3 dBm, les diagrammes sont largement ouverts, indiquant une stabilité accrue du signal, des marges temporelles plus confortables, et une réduction notable du bruit. Cette amélioration visuelle est en parfaite cohérence avec l'augmentation du Q-factor et la diminution du BER observées précédemment.

En résumé, l'analyse des diagrammes de l'œil confirme que le fonctionnement optimal du système est obtenu lorsque la puissance d'émission est suffisamment élevée (≥ -3 dBm), permettant une transmission optique fiable avec un signal bien formé à la réception.

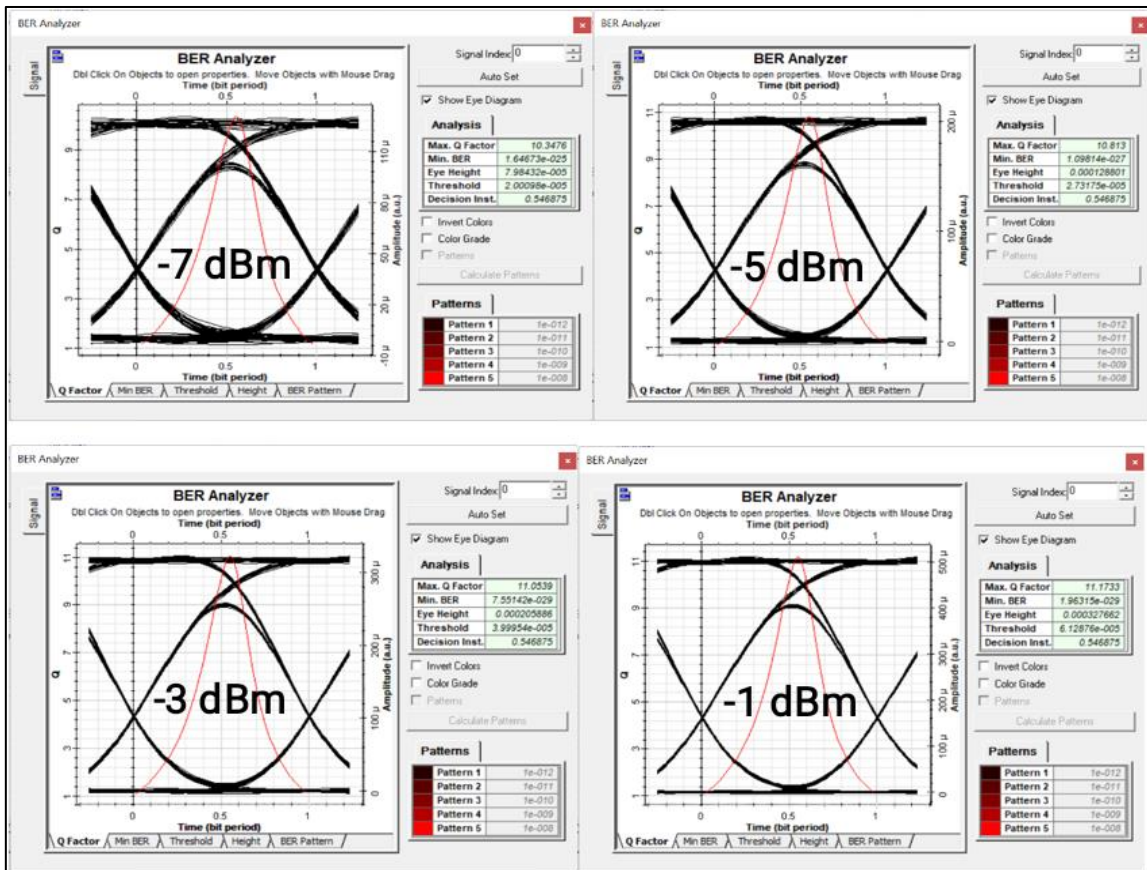


Figure III.8 : Diagramme de l'œil en fonction de la puissance

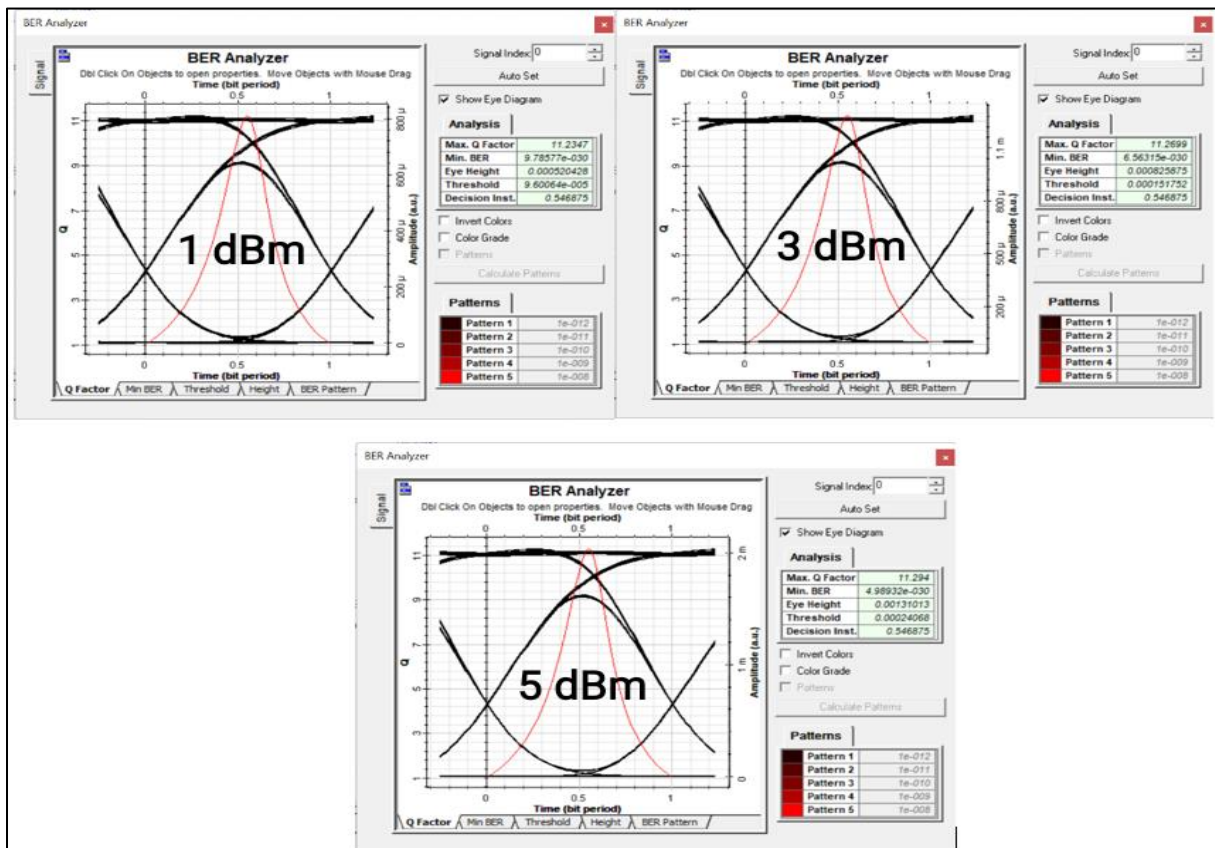


Figure III.9 : Diagramme de l'œil en fonction de la puissance

En conclusion, l'analyse conjointe du tableau III.1 et des figures III.6 à III.9 met en évidence l'impact significatif de la puissance d'émission sur les performances d'un système WDM-PON en topologie étoile. Il est clairement démontré que l'augmentation de la puissance optique permet d'améliorer le facteur de qualité, de réduire le taux d'erreur binaire, et d'ouvrir visiblement le diagramme de l'œil, garantissant ainsi une transmission fiable et de haute qualité. Ces résultats soulignent l'importance d'un réglage optimal de la puissance d'émission, avec un seuil recommandé à partir de -3 dBm, pour assurer un fonctionnement stable du système sans nécessité d'amplification supplémentaire.

III.3.2 Effet de la distance de transmission

Dans cette partie, l'objectif est d'évaluer l'impact de la distance de transmission sur la qualité du signal dans une architecture WDM-PON en étoile. Pour ce faire, plusieurs longueurs de fibre optique ont été testées, allant de 5 km à 150 km, tout en maintenant constants les autres paramètres du système : une puissance d'émission de -5 dBm, une longueur d'onde de 1550 nm et une modulation de type NRZ. À travers cette étude, nous cherchons à identifier la portée maximale à laquelle la transmission reste fiable, en observant les évolutions du facteur de qualité (Q-factor), du taux d'erreur binaire (BER) et des diagrammes de l'œil. Ces indicateurs permettront de mettre en évidence les limitations physiques dues à l'atténuation et à la dispersion, qui affectent inévitablement les performances au fur et à mesure que la distance augmente.

Le tableau suivant résume les résultats du facteur de qualité et du taux d'erreur binaire :

Distance (Km)	BER Analyzer		BER Analyzer 1		BER Analyzer 2		BER Analyzer 3	
	Q-factor	BER	Q-factor	BER	Q-factor	BER	Q-factor	BER
5 km	11.2398	9.30914e-030	11.2457	8.7274e-030	11.3874	1.73641e-030	11.3743	2.04465e-030
10 km	10.813	1.09814e-027	10.8031	1.22733e-027	10.9931	1.52041e-028	10.951	2.42052e-028
25 km	9.02546	7.26032e-020	8.9715	1.18886e-019	9.32404	4.53187e-021	9.18121	1.73112e-020
50 km	5.55995	1.26495e-008	5.44349	2.45191e-008	6.0379	7.26654e-010	5.80629	2.9976e-009
80 km	2.46371	0.00643103	0	1	0	1	2.19935	0.0124845
120 km	0	1	0	1	0	1	0	1
150 km	0	1	0	1	0	1	0	1

Tableau III.2 : Variation du Q-factor et du BER en fonction de la distance

Le tableau III.2 présente l'évolution du facteur de qualité (Q-factor) et du taux d'erreur binaire (BER) en fonction de la distance de transmission pour la topologie WDM-PON en étoile. Les simulations ont été effectuées pour des distances croissantes de 5 km à 150 km, avec une puissance d'émission constante de -5 dBm. Les résultats montrent une dégradation progressive de la qualité du signal à mesure que la distance augmente. Pour les courtes distances (5 km et 10 km), le système offre d'excellentes performances avec des Q-factors supérieurs à 10 et des BER quasi nuls, traduisant une transmission de haute qualité. En revanche, à partir de 25 km, une baisse significative du Q-factor est observée, accompagnée d'une montée rapide du BER. Au-delà de 50 km, les valeurs chutent en dessous des seuils acceptables, et à partir de 80 km, le signal devient fortement dégradé, avec des BER proches de 1, ce qui indique une perte

quasi-totale de l'information transmise. Ces résultats soulignent que, sans amplification ni compensation, la portée maximale efficace du système se situe autour de 50 km.

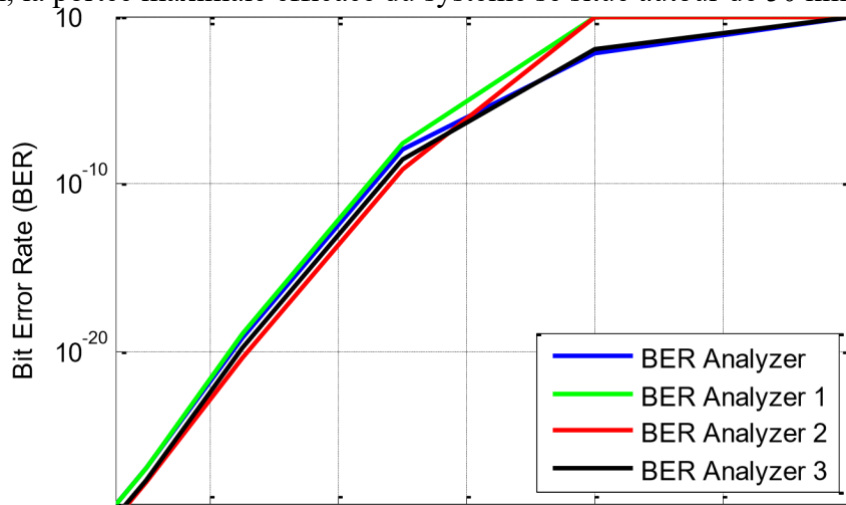


Figure III.10 : Courbe du BER en fonction de la distance

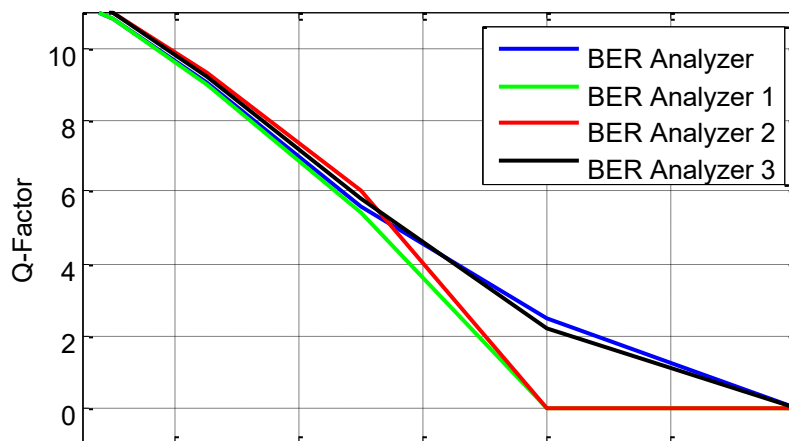


Figure III.11 : Courbe du Q-Factor en fonction de la distance

Les figures III.10 et III.11 illustrent graphiquement l'impact de la distance sur les deux principaux indicateurs de performance du système optique. La figure III.10 montre l'augmentation rapide du taux d'erreur binaire (BER) avec l'allongement de la fibre. On remarque une croissance exponentielle du BER au-delà de 25 km, atteignant des valeurs critiques à partir de 80 km, ce qui reflète une transmission devenue instable et inefficace. La figure III.11 met en évidence la diminution progressive du Q-factor avec l'augmentation de la distance. Celui-ci reste élevé jusqu'à 25 km, garantissant une bonne détection du signal, mais chute brutalement au-delà de cette limite. Ces deux courbes confirment que la distance constitue un paramètre déterminant dans la conception d'un réseau WDM-PON, et qu'il est essentiel d'en tenir compte pour garantir la fiabilité de la transmission optique sans recours à des équipements d'amplification intermédiaire.

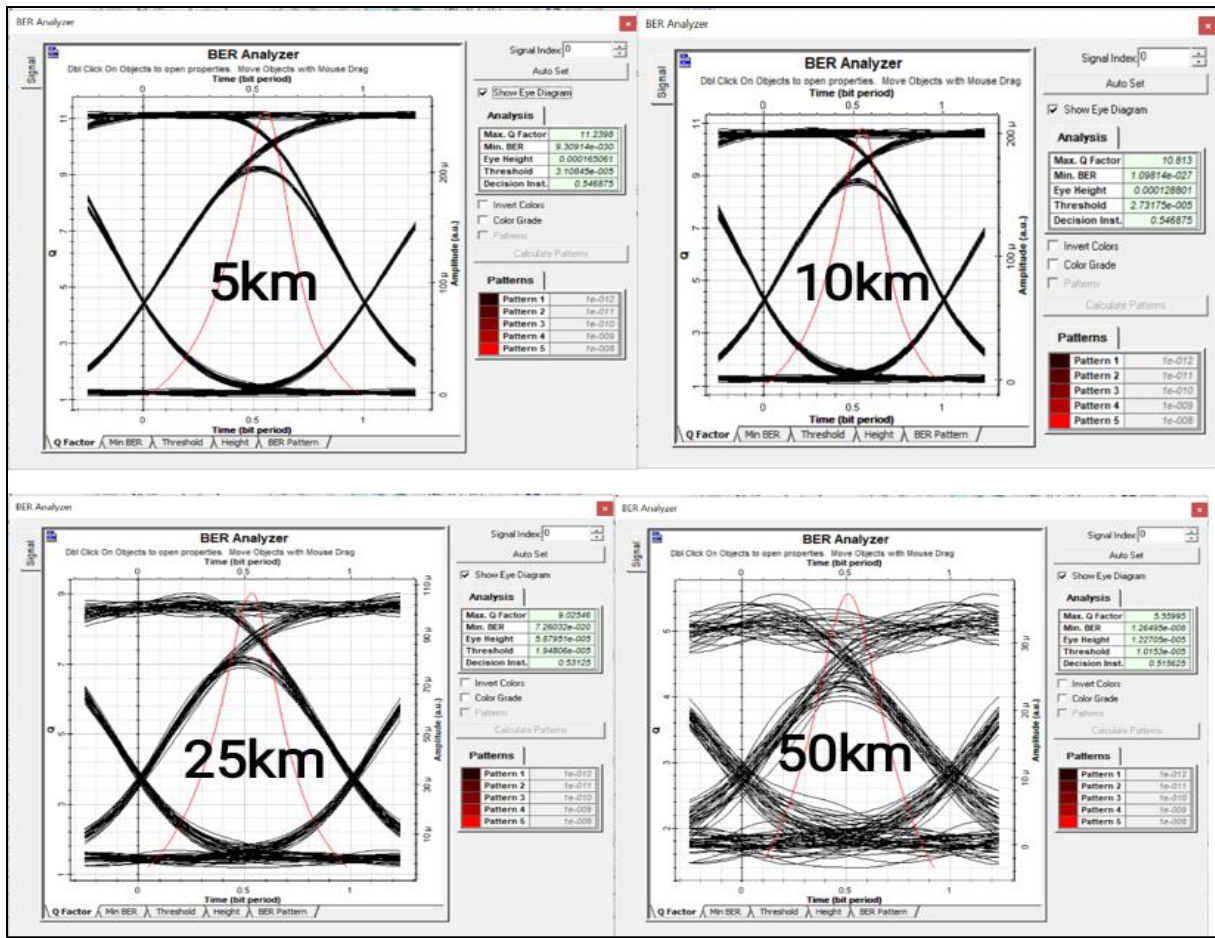


Figure III.12 : Diagramme de l'œil en fonction de la distance

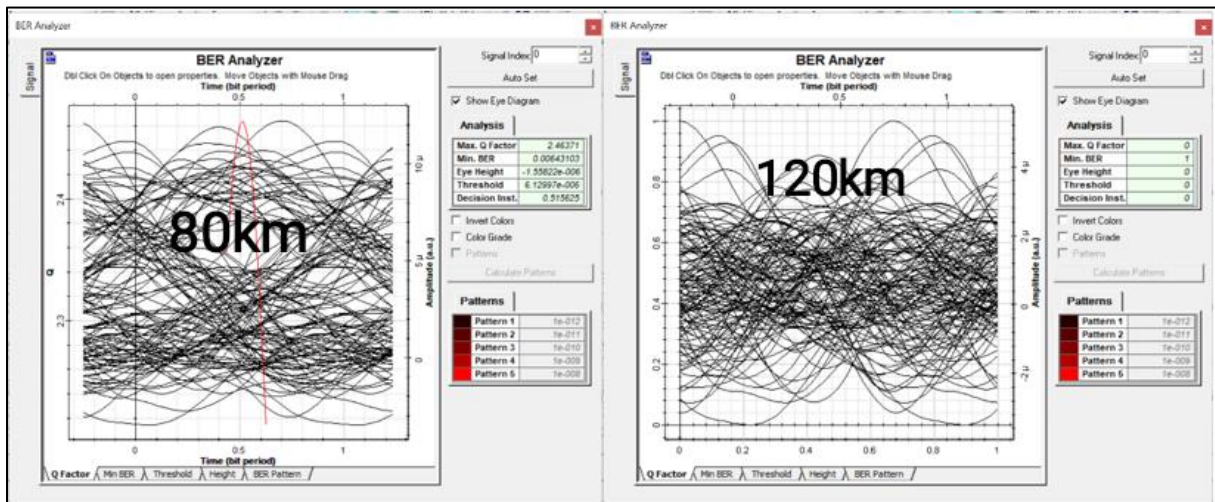


Figure III.13 : Diagramme de l'œil en fonction de la distance

Les figures III.12 et III.13 présentent l'évolution des diagrammes de l'œil en fonction de la distance de transmission pour la topologie en étoile. Ces représentations visuelles permettent de juger rapidement de la qualité du signal reçu. Pour des distances courtes, notamment 5 km et 10 km, les diagrammes sont bien ouverts, révélant une bonne séparation entre les niveaux logiques et une faible influence du bruit. À 25 km, l'ouverture de l'œil commence à se réduire, signe que le signal commence à se détériorer. Lorsque la distance atteint 50 km, l'œil est visiblement moins net, bien que le signal reste exploitable. Au-delà de cette

distance (80 km, 120 km, 150 km), les diagrammes deviennent très fermés, traduisant une forte interférence entre les bits, rendant la détection extrêmement difficile voire impossible. Ces observations confirment les tendances relevées dans les tableaux et courbes précédents, et montrent de manière intuitive la limite physique imposée par la distance sans amplification ou compensation optique.

En résumé, l'ensemble des résultats relatifs à l'impact de la distance (tableau III.2 et figures III.10 à III.13) montre clairement que la performance du système WDM-PON en étoile diminue avec l'augmentation de la longueur de la fibre. Une transmission stable et de qualité est assurée jusqu'à 25 km, voire 50 km dans des conditions optimisées. Au-delà, le système subit une dégradation significative du Q-factor, une hausse du BER, et une fermeture marquée du diagramme de l'œil. Ces résultats démontrent l'importance cruciale de maîtriser la distance de transmission lors de la conception d'un réseau optique passif, en particulier lorsqu'il n'est pas prévu d'intégrer des dispositifs d'amplification ou de régénération optique.

III.3.3 Effet du débit de transmission

Cette section vise à étudier l'influence du débit binaire sur la performance du système WDM-PON en étoile. À mesure que les besoins en bande passante augmentent, notamment dans les applications à haut débit, il est essentiel de déterminer les limites de fonctionnement du réseau selon différents débits de transmission. Pour cela, une série de simulations a été réalisée avec des débits allant de 2,5 Gbit/s à 100 Gbit/s, en maintenant les autres paramètres constants : une distance de 10 km, une puissance d'émission de -5 dBm, et une longueur d'onde de 1550 nm. Les résultats obtenus permettront de mettre en évidence la capacité du système à supporter des débits élevés tout en garantissant une transmission fiable.

Le résultat obtenu est dans le tableau suivant :

Débit Gbits /s	BER Analyzer		BER Analyzer 1		BER Analyzer 2		BER Analyzer 3	
	Q-factor	BER	Q-factor	BER	Q-factor	BER	Q-factor	BER
2.5 Gbits/s	21.3351	2.05121e- 101	19.8355	5.70612e- 088	20.0988	2.82179e- 090	20.5854	1.42919e- 094
5 Gbits/s	16.902	1.69526e- 064	16.4713	2.30822e- 061	17.2673	3.20269e- 067	16.7367	2.72054e- 063
10 Gbits/s	10.813	1.09814e- 027	10.8031	1.22733e- 027	10.9931	1.52041e- 028	10.951	2.42052e- 028
25 Gbits/s	1.80945	0.0312978	1.81855	0.0306791	1.81122	0.0312482	1.81347	0.0310698
50 Gbits/s	2.73564	0.0025455	2.82857	0.00198933	2.7608	0.00241619	2.69731	0.00282358
100 Gbits/s	2.63132	0.0042043	2.70488	0.00341172	2.68323	0.0036457	2.64852	0.00396294

Tableau III.3 : Variation du Q-factor et du BER en fonction du débit

Le tableau III.3 regroupe les valeurs du Q-factor et du BER pour différents débits binaires appliqués au système. Les résultats indiquent une nette dégradation des performances à mesure que le débit augmente. Entre 2,5 Gbit/s et 10 Gbit/s, le système montre d'excellentes performances, avec des Q-factors très élevés (supérieurs à 10) et des BER extrêmement faibles (inférieurs à 10^{-27}), traduisant une qualité de transmission irréprochable. À partir de 25 Gbit/s, on observe une chute drastique du Q-factor (autour de 1,8) et une hausse brutale du BER (de l'ordre de 10^{-2}), indiquant une détérioration notable du signal. Pour les débits de 50 Gbit/s et 100 Gbit/s, les valeurs de Q-factor restent faibles, et bien que le BER s'améliore légèrement à

50 Gbit/s, il demeure inacceptable pour des transmissions critiques. Ces résultats confirment que le système atteint ses limites de performance au-delà de 10 Gbit/s.

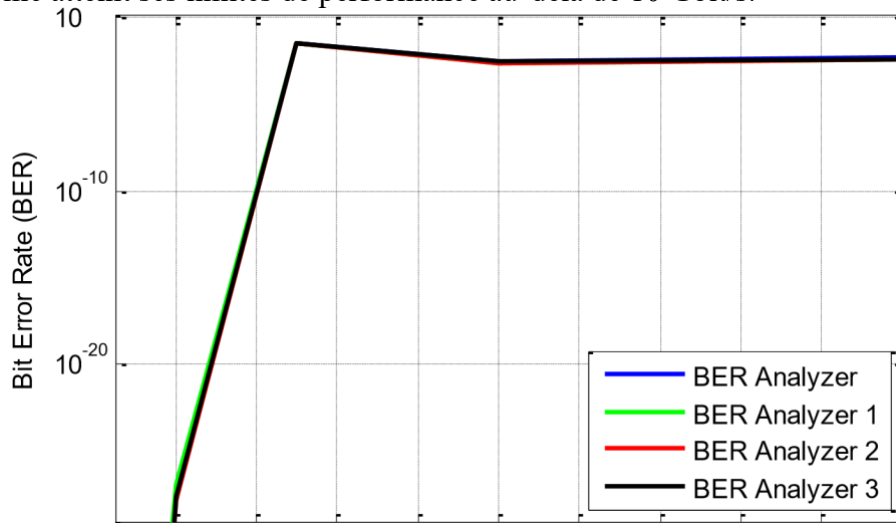


Figure III.14 : Courbe du BER en fonction du débit

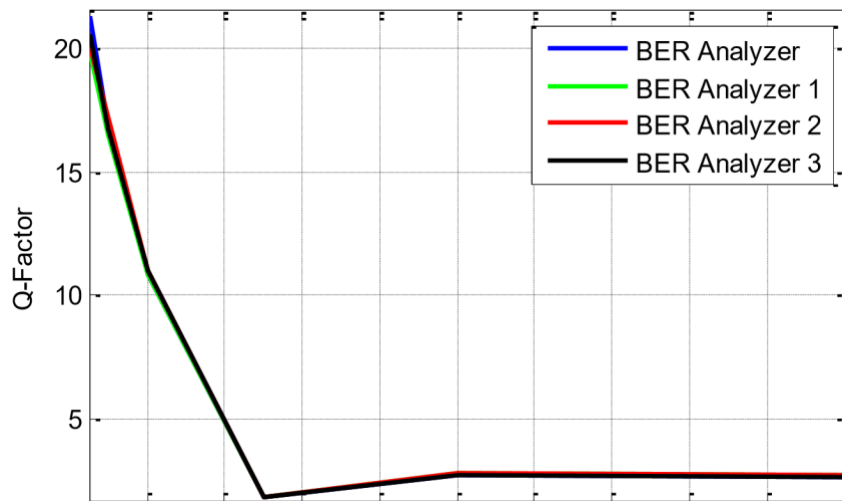


Figure III.15 : Courbe du Q-Factor en fonction du débit

Les figures III.14 et III.15 offrent une représentation graphique des résultats du tableau III.3. La figure III.14 montre que le taux d'erreur binaire reste très faible pour les faibles débits (jusqu'à 10 Gbit/s), puis augmente brusquement à partir de 25 Gbit/s, atteignant des niveaux critiques à 100 Gbit/s. De manière complémentaire, la figure III.15 illustre la décroissance du Q-factor, qui chute fortement à partir de 10 Gbit/s. Ces deux courbes soulignent que la performance du système est fortement impactée par l'augmentation du débit binaire, et que la zone de fonctionnement optimale se situe en dessous de 10 Gbit/s.

Les figures III.16 et III.17 présentent les diagrammes de l'œil correspondant aux différents débits testés. Pour les faibles débits (2,5 et 5 Gbit/s), les diagrammes sont bien ouverts, ce qui confirme une bonne séparation des symboles et un faible niveau de bruit. À 10 Gbit/s, l'œil reste suffisamment ouvert pour garantir une détection fiable. En revanche, à partir de 25 Gbit/s, le diagramme commence à se fermer significativement, avec un chevauchement visible entre les bits. À 50 Gbit/s, l'œil est très restreint, indiquant une forte interférence intersymboles, et à 100 Gbit/s, l'œil est pratiquement fermé, ce qui rend la détection du signal extrêmement difficile. Ces représentations confirment visuellement les limitations en débit du système.

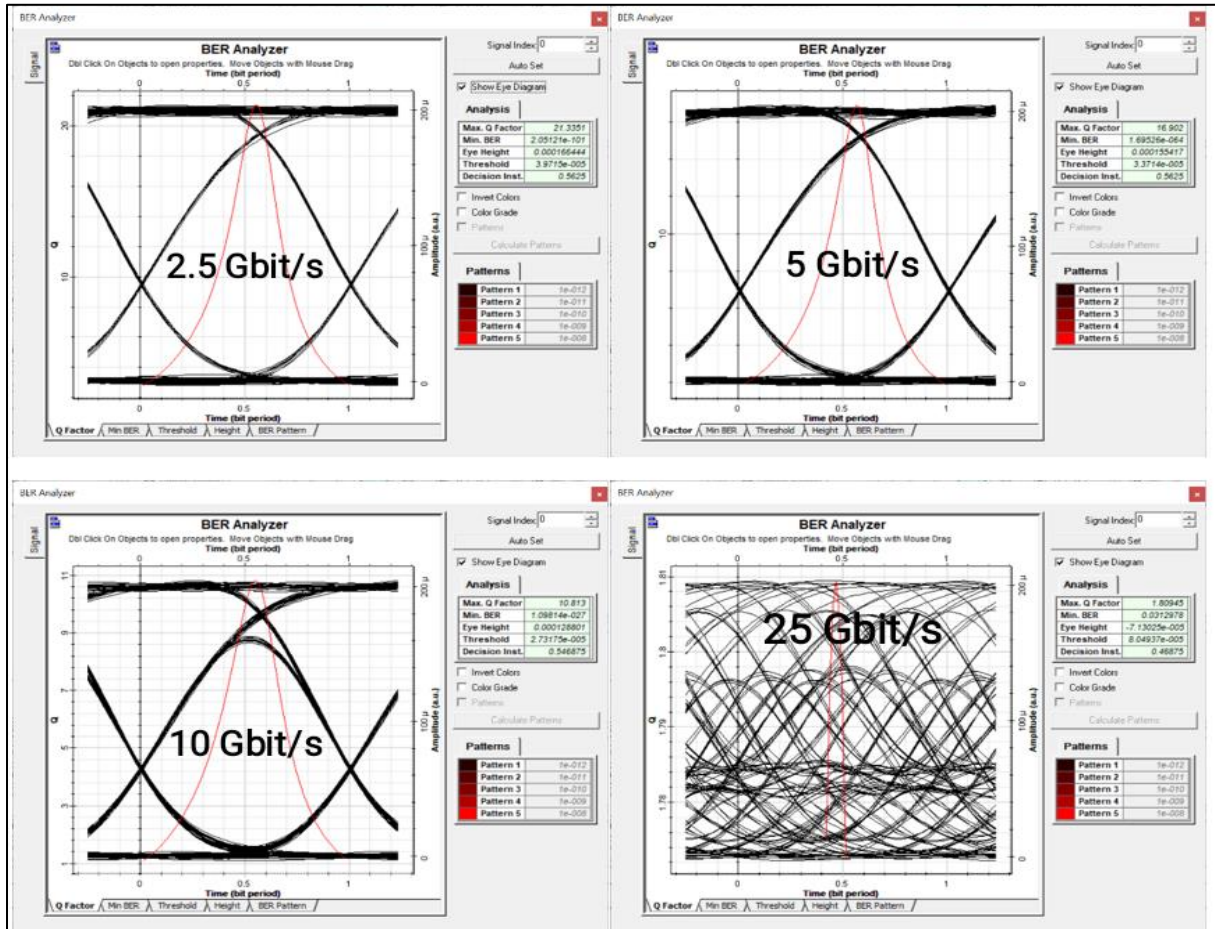


Figure III.16 : Diagramme de l'œil en fonction du débit

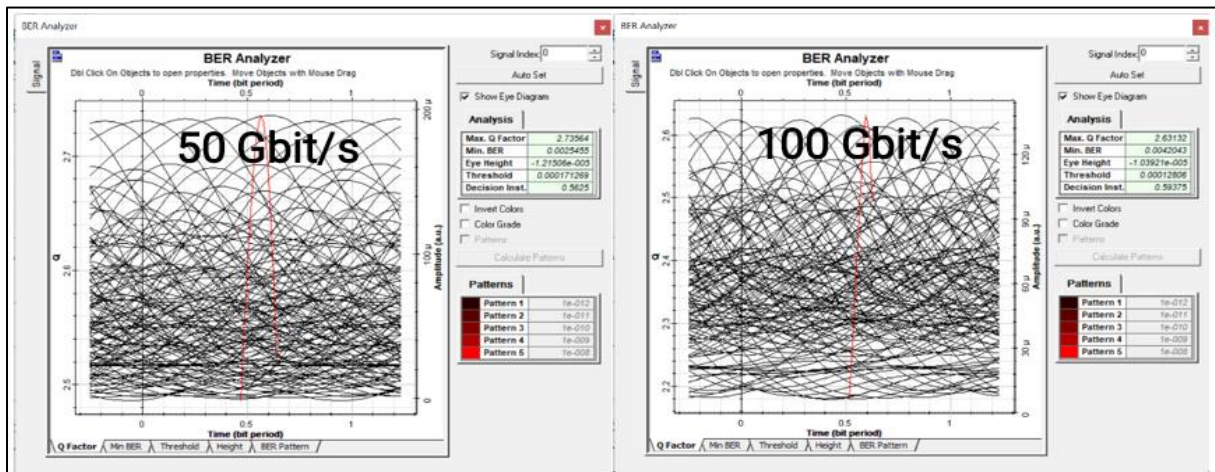


Figure III.17 : Diagramme de l'œil en fonction du débit

En conclusion, les résultats obtenus montrent que le système WDM-PON en topologie étoile offre une excellente performance pour des débits allant jusqu'à 10 Gbit/s, avec un signal stable, un Q-factor élevé et un BER négligeable. Au-delà de ce seuil, les performances chutent rapidement, rendant la transmission inefficace sans mécanismes de compensation ou de correction d'erreur. Ces résultats soulignent l'importance de limiter le débit binaire dans les

architectures passives sans amplification, ou bien de renforcer le système à travers des technologies complémentaires si des débits très élevés sont requis.

III.4 Scénario 2 : Analyse des Performances – Topologie en Arbre

Dans cette partie, nous analysons la performance d'une seconde architecture WDM-PON reposant sur une topologie en arbre hiérarchique. Contrairement à la topologie en étoile du scénario précédent, cette structure utilise plusieurs niveaux de démultiplexage passif. Le signal optique multiplexé est d'abord séparé en deux branches à l'aide d'un démultiplexeur WDM 1x2, puis chacune de ces branches est à nouveau divisée par un second démultiplexeur 1x2, pour desservir au total quatre utilisateurs. Cette organisation permet une certaine évolutivité, mais au prix de pertes optiques cumulatives dues à la multiplication des composants passifs. L'objectif de cette section est donc d'évaluer dans quelle mesure cette architecture affecte la qualité de transmission, à travers une étude de la puissance d'émission, de la distance de transmission et du débit binaire, toujours en observant les indicateurs Q-factor, BER et diagrammes de l'œil.

La figure III.18 présente Scénario 1 en arbre pour l'architecture (WDM-PON).

Ce scénario est divisé en trois parties :

A. Système de transmission

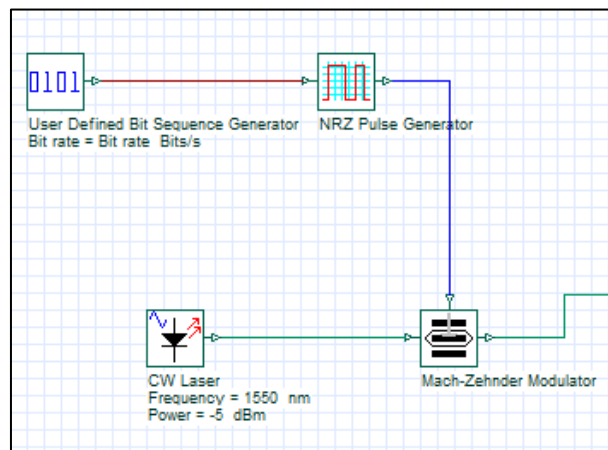


Figure III.18 : Partie d'émission

B. Canal de transmission

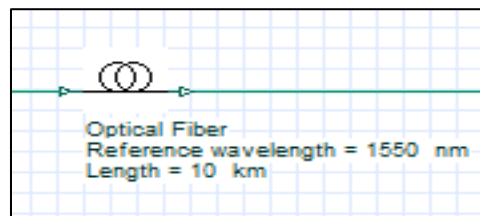


Figure III.19 : Partie de transmission

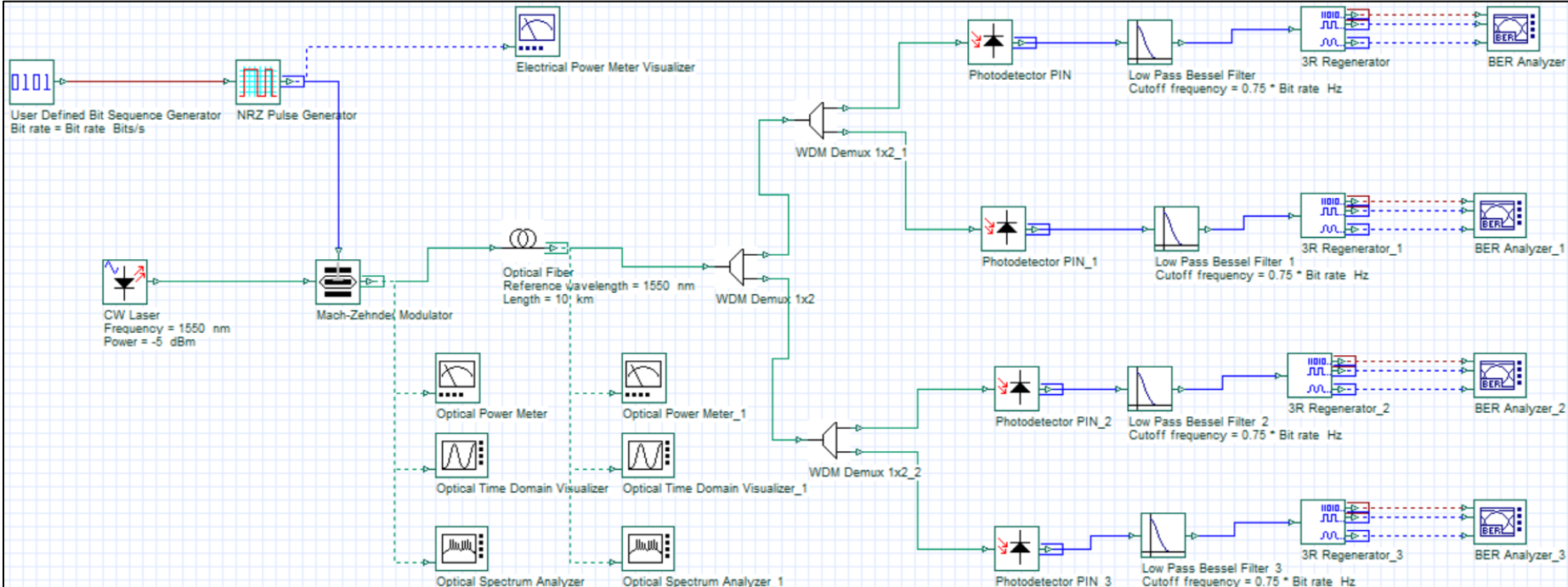


Figure III.20 : Scénario 2 WDM-PON

C. Système de réception

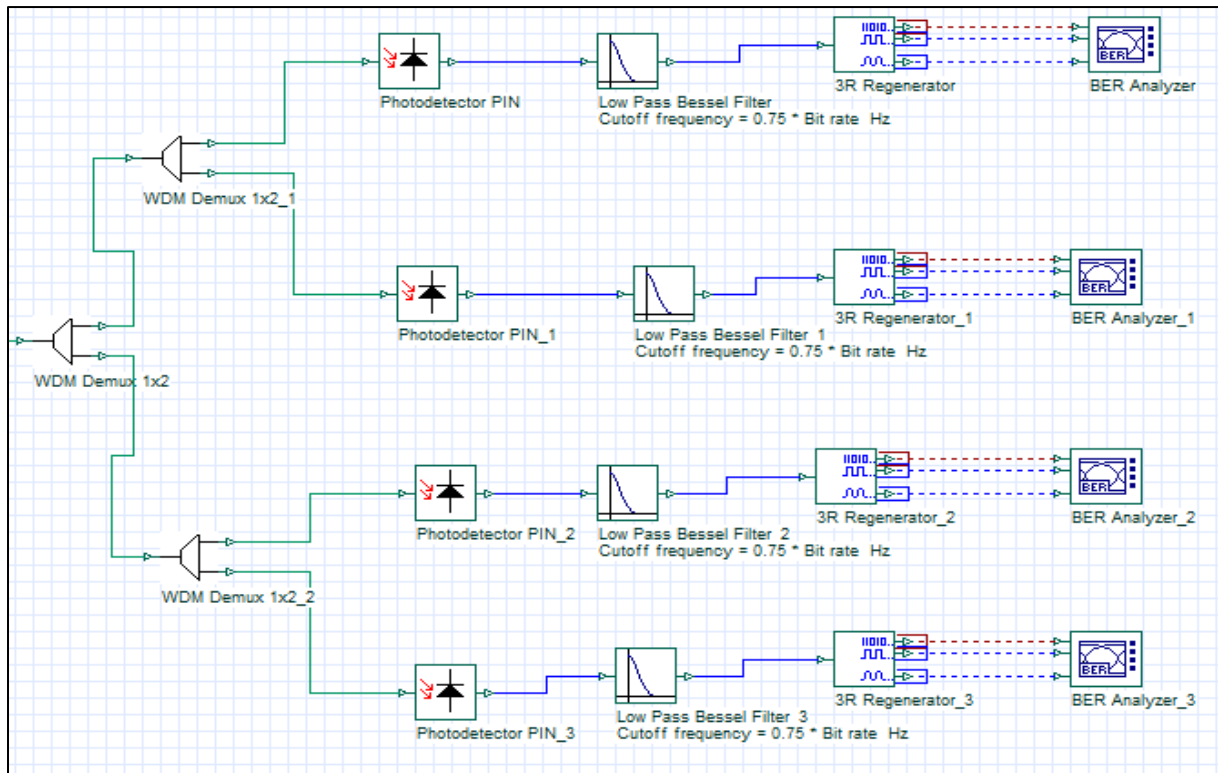


Figure III.21 : Partie de réception

III.4.1 Effet de la puissance d'émission

Puissance (dBm)	BER Analyzer		BER Analyzer 1		BER Analyzer 2		BER Analyzer 3	
	Q-factor	BER	Q-factor	BER	Q-factor	BER	Q-factor	BER
-7 dBm	5.50948	1.57483e-008	5.5557	1.22051e-008	5.42224	2.55635e-008	5.49213	1.72405e-008
-5 dBm	5.56312	1.15127e-008	5.59206	9.80013e-009	5.51567	1.50164e-008	5.55747	1.18399e-008
-3 dBm	5.58617	1.00556e-008	5.6028	9.16527e-009	5.56099	1.15802e-008	5.58686	9.99279e-009
-1 dBm	5.59642	9.4685e-009	5.60499	9.02903e-009	5.5837	1.01676e-008	5.60032	9.24745e-009
1 dBm	5.60143	9.19638e-009	5.60506	9.01693e-009	5.59564	9.4974e-009	5.60669	8.91679e-009
3 dBm	5.60434	9.04412e-009	5.60511	9.01124e-009	5.60237	9.1422e-009	5.60992	8.75643e-009
5 dBm	5.60658	8.93137e-009	5.60582	8.97559e-009	5.60663	8.9265e-009	5.6119	8.66154e-009

Tableau III.4 : Variation du Q-factor et du BER en fonction de la puissance d'émission

Le tableau III.4 présente les résultats de simulation pour la topologie WDM-PON en arbre, avec variation de la puissance d'émission de -7 dBm à 5 dBm, une distance fixe de 10 km et une longueur d'onde de 1550 nm. Contrairement au scénario en étoile, les valeurs du Q-

factor restent relativement faibles, oscillant autour de 5,5 même pour les puissances élevées. Cela reflète la dégradation de la qualité du signal due aux pertes cumulées induites par les deux niveaux de démultiplexage passif. De même, le BER reste élevé, de l'ordre de 10^{-8} , ce qui traduit une transmission moins fiable, même lorsque la puissance est suffisante. L'architecture en arbre montre ainsi une sensibilité accrue à l'atténuation optique, limitant son efficacité dans les réseaux passifs sans amplification.

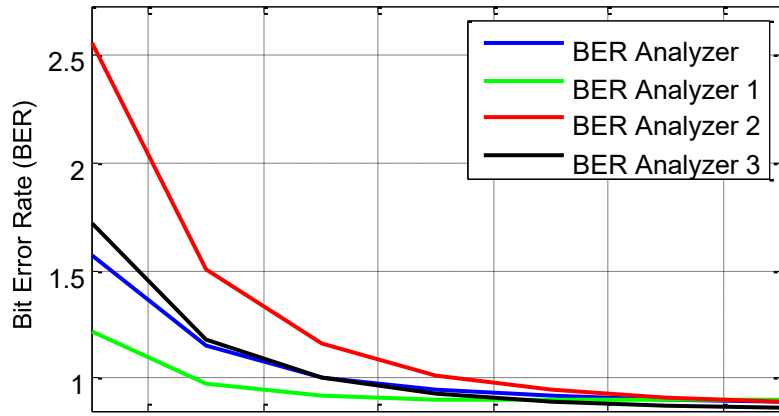


Figure III.22 : Courbe du BER en fonction de la puissance

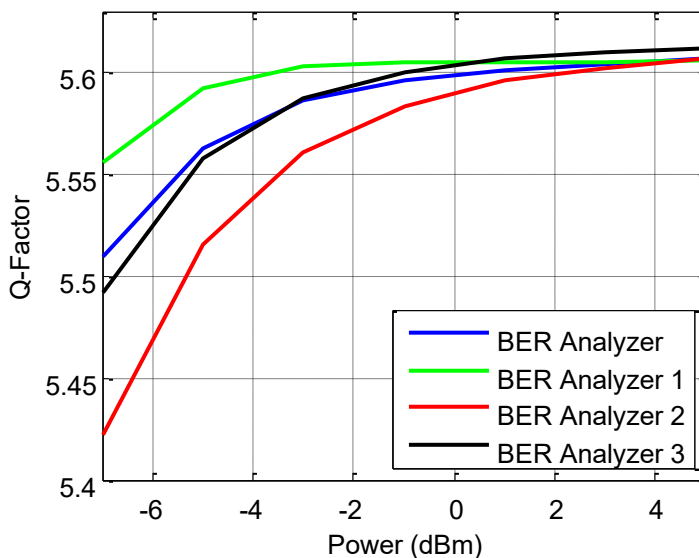


Figure III.23 : Courbe du Q-Factor en fonction de la puissance

Les courbes représentées dans les figures III.22 (BER) et III.23 (Q-factor) illustrent graphiquement la stagnation des performances malgré l'augmentation de la puissance d'émission. Contrairement à la topologie en étoile où l'on observe une nette amélioration avec la puissance, ici les variations sont minimales. Le BER reste pratiquement constant sur toute la plage de puissance testée, tandis que le Q-factor atteint difficilement la valeur de 6, seuil généralement considéré comme minimal pour une transmission fiable. Ces courbes confirment que l'architecture en arbre, bien que plus flexible, engendre une dégradation notable du signal optique, rendant la transmission plus vulnérable aux pertes.

Chapitre III : Résultats de Simulation et Analyse Comparative

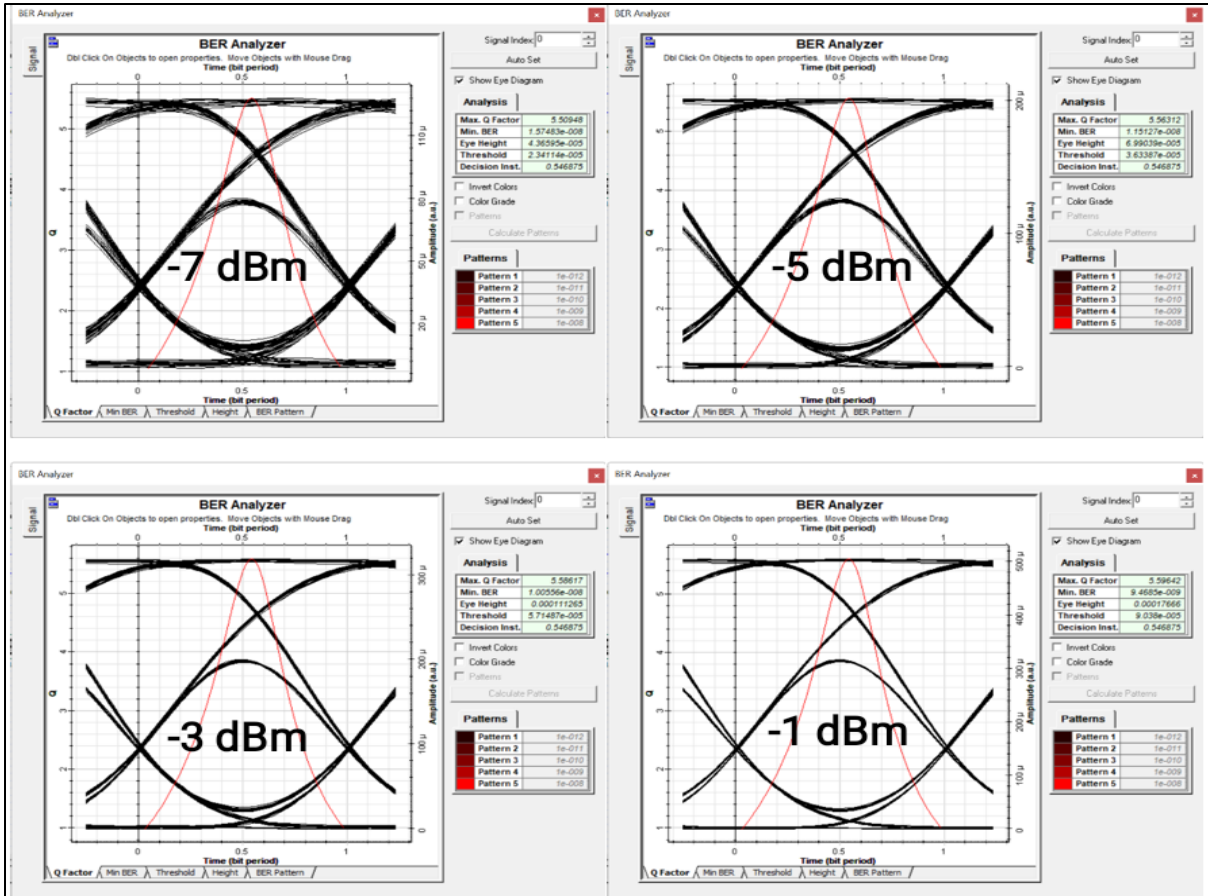


Figure III.24 : Diagramme de l'œil en fonction de la puissance

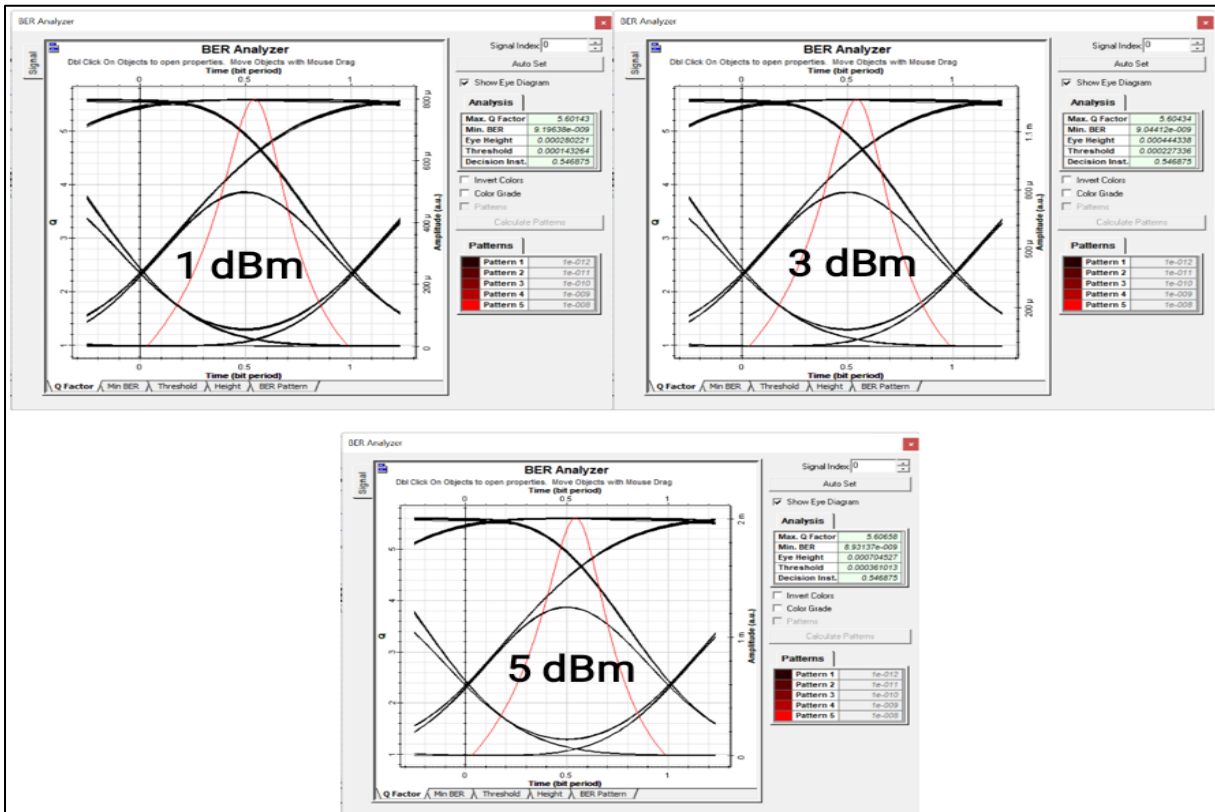


Figure III.25 : Diagramme de l'œil en fonction de la puissance

Les diagrammes de l'œil correspondant à cette configuration (figures III.24 et III.25) traduisent visuellement les résultats précédents. On observe que, même à des puissances élevées, l'œil demeure modérément fermé, ce qui reflète une mauvaise séparation des niveaux logiques du signal. L'ouverture de l'œil reste insuffisante pour assurer une détection fiable sans erreurs, et le bruit intersymboles est plus prononcé. Cela confirme que les pertes introduites par les deux démultiplexeurs 1x2 en cascade impactent fortement la qualité du signal, même à courte distance et avec une puissance suffisante.

En conclusion, les résultats de cette section montrent clairement que la topologie en arbre est moins performante que la topologie en étoile en termes de tolérance à la puissance d'émission. Les pertes optiques générées par les composants passifs en série limitent l'efficacité de la transmission. Le Q-factor reste faible, le BER élevé, et les diagrammes de l'œil peu ouverts, ce qui confirme une transmission dégradée même dans des conditions favorables (puissance et distance faibles). Ces constats doivent être pris en compte lors du choix d'une architecture WDM-PON, notamment lorsqu'aucune amplification optique n'est prévue dans le réseau.

III.4.2 Effet de la distance de transmission

Le tableau III.5 présente les résultats de simulation obtenus pour différentes distances de transmission, allant de 5 km à 150 km, dans une architecture en arbre. La puissance d'émission est maintenue constante à -5 dBm. On observe que, même à courte distance (5–10 km), le Q-factor reste modérément faible (autour de 5,6) et le BER relativement élevé (10^{-8}), ce qui indique une performance moyenne dès le départ. À partir de 25 km, la dégradation s'accélère : le Q-factor chute nettement et le BER croît rapidement, atteignant des valeurs critiques. Pour des distances au-delà de 80 km, le Q-factor tombe à zéro et le BER atteint 1, ce qui correspond à une perte totale du signal. Cette détérioration est attribuée à l'accumulation de pertes optiques et à l'absence d'amplification ou de régénération dans le système.

Distance (Km)	BER Analyzer		BER Analyzer 1		BER Analyzer 2		BER Analyzer 3	
	Q-factor	BER	Q-factor	BER	Q-factor	BER	Q-factor	BER
5 km	5.61979	8.26577e-009	5.64198	7.29784e-009	5.5847	1.00775e-008	5.61812	8.31911e-009
10 km	5.56312	1.15127e-008	5.59206	9.80013e-009	5.51567	1.50164e-008	5.55747	1.18399e-008
25 km	5.19692	9.02736e-008	5.25344	6.74044e-008	5.0923	1.56843e-007	5.17061	1.03345e-007
50 km	4.04472	2.51958e-005	4.15428	1.59555e-005	3.75511	8.23361e-005	3.92819	4.03771e-005
80 km	2.36027	0.0083357	2.31426	0.0095876	2.19905	0.0123343	2.14191	0.01565
120 km	0	1	0	1	0	1	0	1
150 km	0	1	0	1	0	1	0	1

Tableau III.5 : Variation du Q-factor et du BER en fonction de la distance

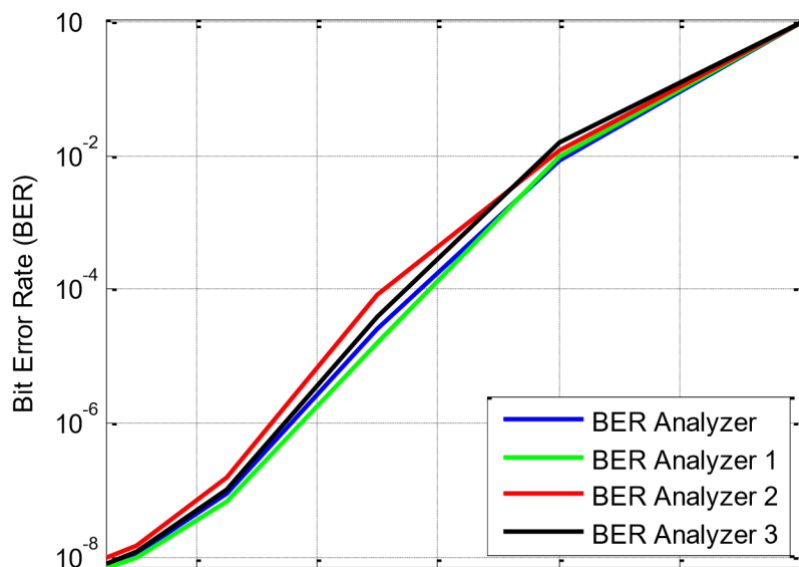


Figure III.26 : Courbe du BER en fonction de la distance

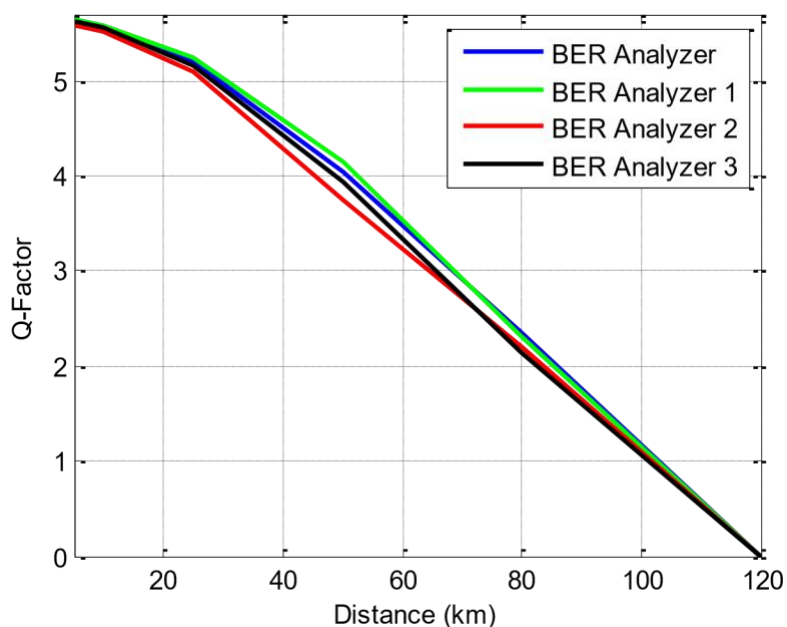


Figure III.27 : Courbe du Q-Factor en fonction de la distance

Les figures III.26 (BER) et III.27 (Q-factor) confirment ces tendances. Le BER reste faible et stable pour 5–10 km, mais augmente fortement à partir de 25 km, atteignant un maximum dès 80 km. Le Q-factor, quant à lui, montre une décroissance rapide dès 25 km, indiquant une chute de la qualité du signal. Ces courbes montrent que la portée maximale fiable du système se limite à environ 10 km, au-delà de quoi la qualité de transmission devient insuffisante.

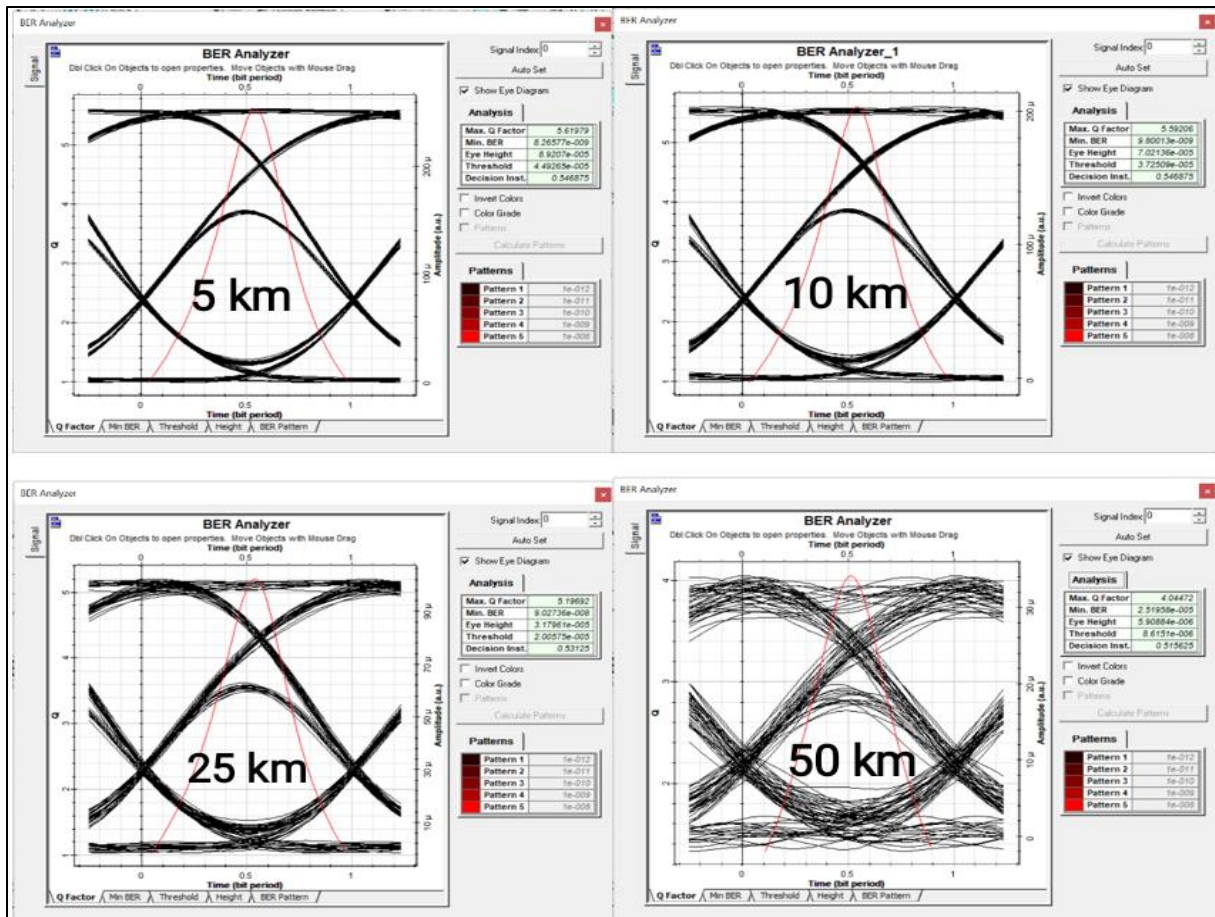


Figure III.28 : Diagramme de l'œil en fonction de la distance

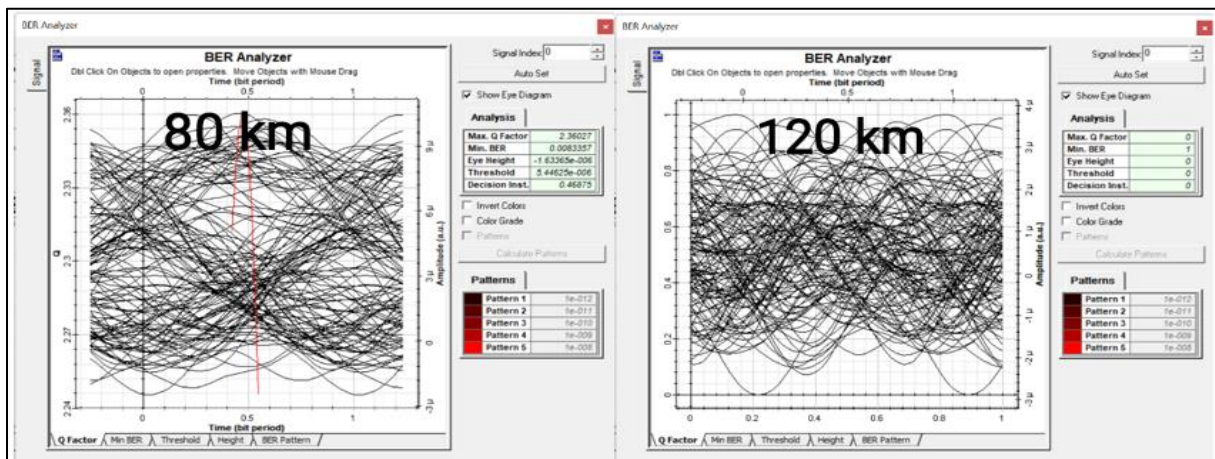


Figure III.29 : Diagramme de l'œil en fonction de la distance

Les diagrammes de l'œil permettent de visualiser la dégradation du signal. À 5 km et 10 km, l'œil est relativement ouvert, bien que moins net que dans le scénario en étoile. Dès 25 km, le diagramme se referme, montrant des transitions peu distinctes. À 50 km et au-delà, l'œil est presque complètement fermé, signe de graves interférences intersymboles et d'une détection peu fiable, voire impossible. Ces observations illustrent visuellement les limitations de distance dans cette topologie.

En résumé, l'architecture en arbre supporte difficilement les longues distances. Malgré une transmission encore acceptable jusqu'à 10 km, la qualité se détériore très rapidement au-

delà. Les pertes introduites par les deux étages de démultiplexage passif réduisent considérablement la portée du réseau. Ce type d'architecture, sans amplification intermédiaire, doit donc être réservé à des déploiements ultra-courts, où la simplicité topologique prime sur la performance.

III.4.3 Effet du débit de transmission

Le tableau III.6 présente l'effet de l'augmentation du débit binaire (de 2,5 Gbit/s à 100 Gbit/s) sur les performances du système, à distance fixe (10 km) et puissance d'émission constante (-5 dBm). Jusqu'à 10 Gbit/s, les résultats restent relativement corrects : Q-factor entre 5,5 et 9,7, et BER inférieur à 10^{-8} . Cependant, à partir de 25 Gbit/s, le système devient instable : le Q-factor chute à environ 4, et le BER s'approche de 10^{-5} . À 50 Gbit/s, on observe une amélioration inattendue du Q-factor ($\sim 5,8$), mais à 100 Gbit/s, les performances s'effondrent totalement (BER = 1, Q = 0), indiquant une incapacité du système à fonctionner à très haut débit.

Débit Gbits /s	BER Analyzer		BER Analyzer 1		BER Analyzer 2		BER Analyzer 3	
	Q-factor	BER	Q-factor	BER	Q-factor	BER	Q-factor	BER
2.5 Gbits/s	9.71568	9.71549e-023	9.78316	5.0418e-023	9.69954	1.13894e-022	9.82313	3.34404e-023
5 Gbits/s	8.24753	6.37748e-017	7.97209	6.34215e-016	7.9771	6.09559e-016	8.15322	1.4045e-016
10 Gbits/s	5.56312	1.15127e-008	5.59206	9.80013e-009	5.51567	1.50164e-008	5.55747	1.18399e-008
25 Gbits/s	3.97852	3.03896e-005	4.06449	2.05742e-005	4.03747	2.29585e-005	3.96274	3.24537e-005
50 Gbits/s	5.80164	2.56998e-009	6.02544	6.24123e-010	5.60481	8.14464e-009	5.81204	2.47812e-009
100 Gbits/s	0	1	0	1	0	1	0	1

Tableau III.6 : Variation du Q-factor et du BER en fonction du débit

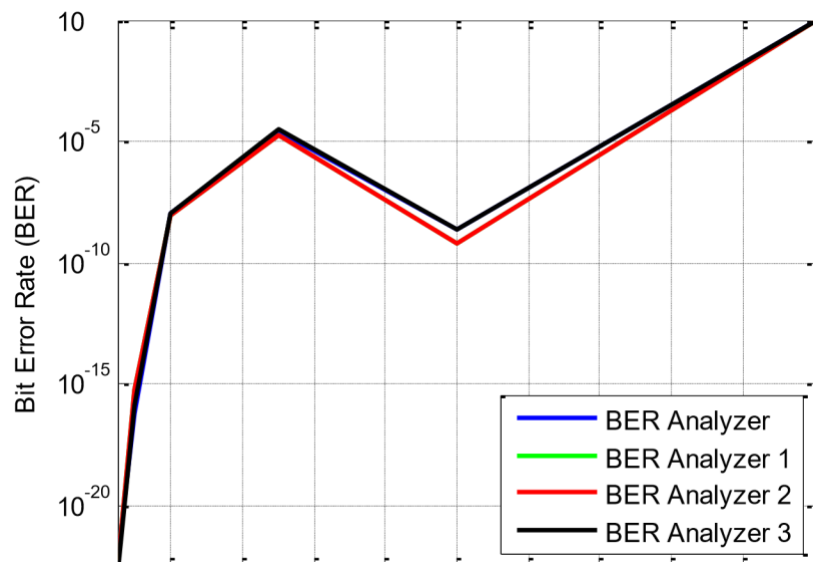


Figure III.30 : Courbe du BER en fonction du débit

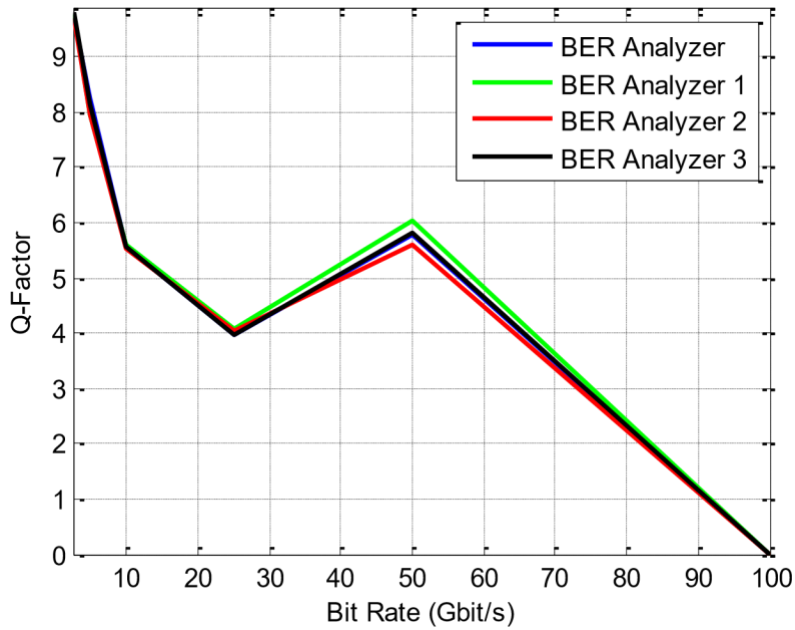


Figure III.31 : Courbe du Q-Factor en fonction du débit

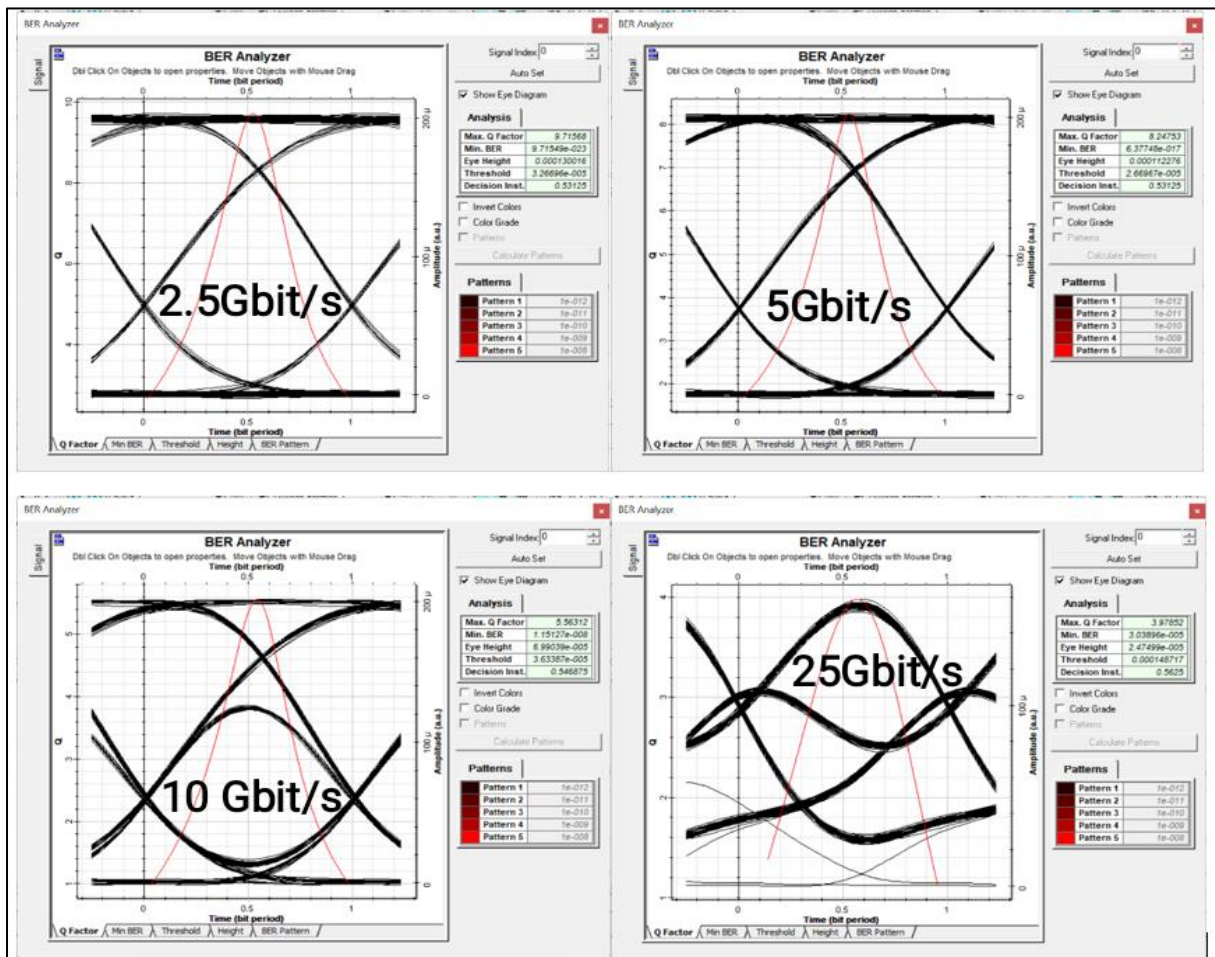


Figure III.32 : Diagramme de l'œil en fonction du débit

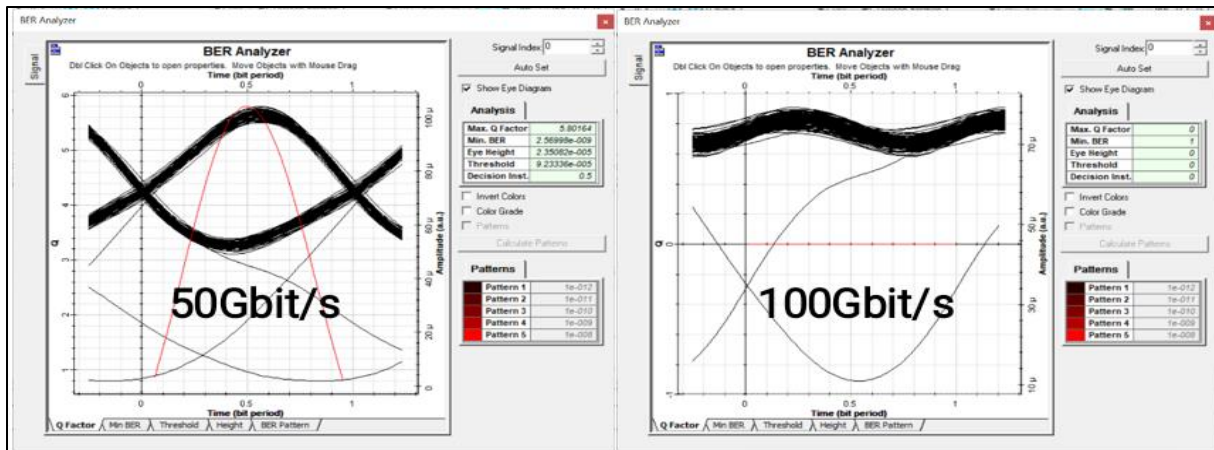


Figure III.33 : Diagramme de l'œil en fonction du débit

Les figures III.30 et III.31 confirment cette tendance. Le BER augmente progressivement à partir de 10 Gbit/s, franchissant les seuils critiques à partir de 25 Gbit/s. La courbe du Q-factor montre une dégradation continue, à l'exception d'un pic temporaire à 50 Gbit/s, probablement lié à un artefact de simulation ou à une marge de tolérance limitée. Ces figures confirment que le système fonctionne correctement uniquement jusqu'à 10 Gbit/s, et que toute tentative de transmission à des débits plus élevés nécessite des améliorations matérielles (amplification, égalisation).

Les diagrammes de l'œil montrent que le signal est stable et bien formé pour 2,5 Gbit/s et 5 Gbit/s. À 10 Gbit/s, le signal reste exploitable, bien que moins net. À partir de 25 Gbit/s, l'œil devient flou et partiellement fermé, révélant un fort niveau de bruit et des erreurs potentielles. À 50 Gbit/s, le signal reste difficilement détectable, mais à 100 Gbit/s, l'œil est totalement fermé, ce qui confirme une perte complète d'intégrité du signal.

L'architecture en arbre WDM-PON ne supporte que des débits modérés, avec un seuil critique à 10 Gbit/s. Les pertes optiques internes et l'absence de composants actifs limitent fortement la capacité du système à transmettre à haut débit. Ces résultats indiquent que cette architecture, bien qu'économique, n'est pas adaptée aux services à très haut débit sans intégration de dispositifs compensateurs.

Les résultats obtenus pour la topologie en arbre confirment ses limitations face aux exigences de performance sur longue distance ou à haut débit. Afin de mieux mettre en perspective les forces et faiblesses de chaque configuration, la section suivante propose une analyse comparative entre les deux scénarios étudiés.

III.5 Analyse Comparative entre les Deux Topologies

Après avoir évalué séparément les performances des deux architectures WDM-PON – à savoir la topologie en étoile (Scénario 1) et la topologie en arbre (Scénario 2) – cette section se consacre à une analyse comparative structurée, permettant de mettre en lumière les avantages, les limites et les compromis techniques propres à chacune. Les comparaisons portent sur trois paramètres essentiels de performance : la puissance d'émission, la distance de transmission et le débit binaire.

Cette étude vise à identifier quelle topologie répond le mieux à des exigences spécifiques en matière de portée, de qualité de signal et de capacité, dans un contexte sans amplification ni compensation optique. Elle s'appuie sur des données quantitatives (Q-factor, BER) ainsi que sur des observations qualitatives (diagrammes de l'œil), et aboutit à des recommandations concrètes pour le déploiement optimal de réseaux WDM-PON selon le profil d'usage visé.

III.5.1 Comparaison sur la puissance

L'étude de l'influence de la puissance d'émission sur les performances des deux topologies met en évidence des différences significatives. Dans le scénario 1 (topologie en étoile), une augmentation progressive de la puissance, de -7 dBm à 5 dBm, se traduit par une amélioration nette de la qualité du signal. Le Q-factor atteint des valeurs supérieures à 11 dès -3 dBm, tandis que le BER chute à des niveaux quasi nuls (inférieurs à 10^{-30}), indiquant une transmission très fiable. Cela s'explique par la structure simple du réseau, où un seul démultiplexeur 1x4 est utilisé, ce qui limite les pertes optiques.

En revanche, dans le scénario 2 (topologie en arbre), la performance reste quasiment constante, même en augmentant la puissance. Le Q-factor plafonne autour de 5,6 et le BER reste stable autour de 10^{-8} , ce qui traduit une transmission moins efficace. Cette stagnation s'explique par la présence de deux étages de démultiplexage 1x2 en cascade, qui génèrent des pertes cumulées, rendant le système moins sensible à une augmentation de la puissance d'émission.

Quel scénario tolère mieux les faibles puissances ?

Le scénario 1 tolère beaucoup mieux les faibles puissances. Dès -7 dBm, il offre déjà un Q-factor supérieur à 10 et un BER très faible, ce qui n'est pas le cas du scénario 2, où les performances sont limitées même à forte puissance. Ce comportement montre que la topologie en étoile est plus robuste énergétiquement, et adaptée aux déploiements où l'amplification optique n'est pas envisageable.

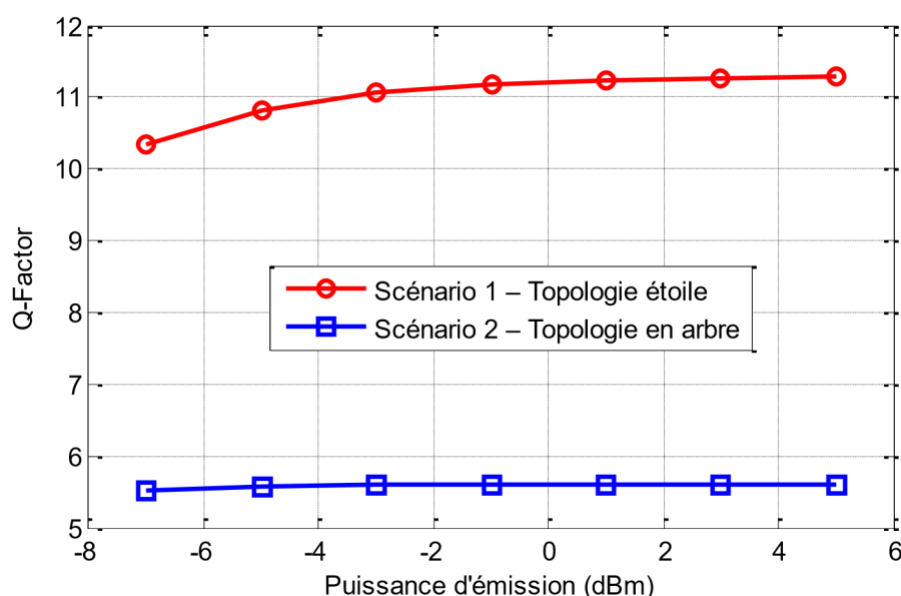


Figure III.34 : Variation du Q-factor en fonction de la puissance – Comparaison des deux scénarios

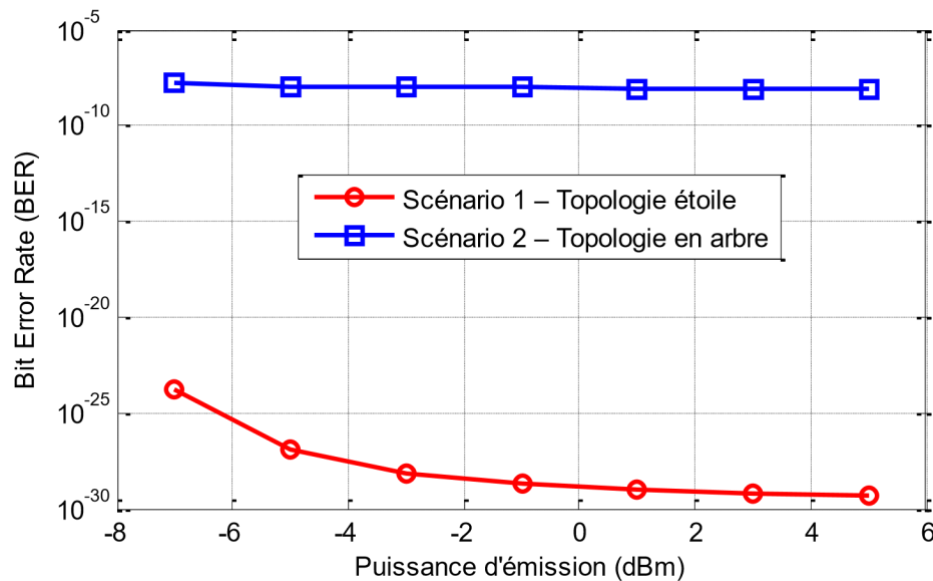


Figure III.35 : Variation du BER en fonction de la puissance – Comparaison des deux scénarios

III.5.2 Comparaison sur la distance

L'évaluation comparative des performances en fonction de la distance de transmission permet de souligner la capacité de chaque architecture à maintenir un signal de qualité sur des portées croissantes.

Dans le scénario 1 (topologie en étoile), les résultats montrent que le système reste performant jusqu'à 50 km. Le Q-factor reste supérieur à 5,5 jusqu'à cette distance, et le BER reste inférieur à 10^{-8} , ce qui est acceptable dans la plupart des applications. Cette robustesse s'explique par une structure simple, à faibles pertes, où un seul démultiplexeur est intercalé dans la liaison. Les diagrammes de l'œil restent bien ouverts jusqu'à cette limite, attestant de la stabilité du signal.

À l'inverse, dans le scénario 2 (topologie en arbre), les performances se dégradent de manière notable dès 25 km. Le Q-factor chute rapidement en dessous de 5, et le BER augmente fortement, atteignant des valeurs critiques dès 50 km. À partir de 80 km, les simulations révèlent un Q-factor nul et un BER de 1, indiquant une perte totale du signal. Cette fragilité est due à l'accumulation des pertes dans les deux étages de démultiplexage passif, qui altèrent fortement la portée utile du système.

Quel scénario supporte les longues distances ?

Sans ambiguïté, le scénario 1 (étoile) est mieux adapté aux transmissions longue distance. Il permet de garantir une qualité de service stable jusqu'à 50 km, tandis que le scénario 2 n'offre qu'une portée utile de 10 à 25 km au maximum.

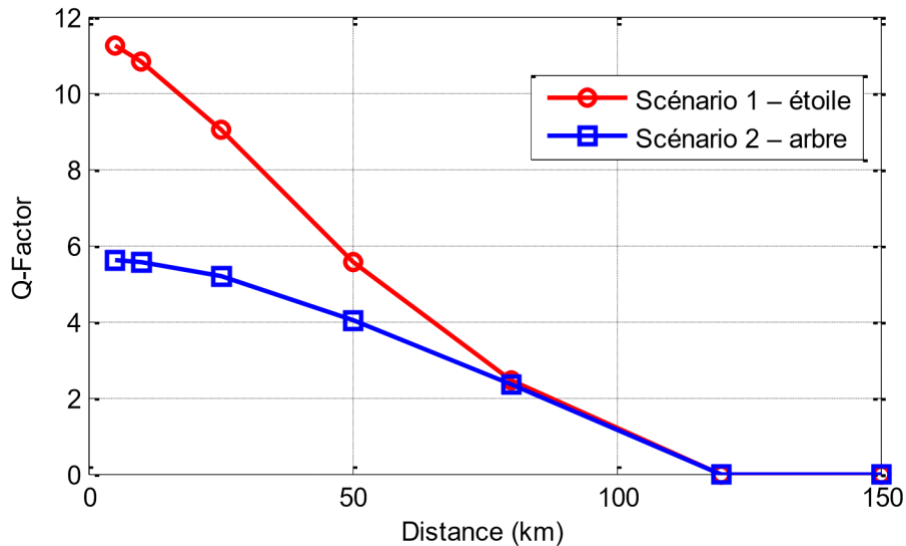


Figure III.36 : Variation du Q-factor en fonction de la distance – Comparaison des deux scénarios

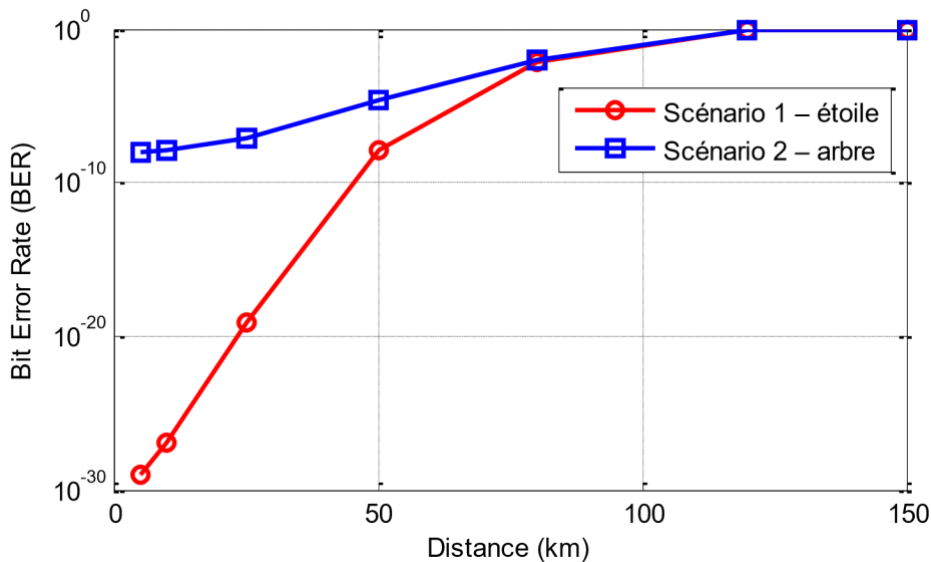


Figure III.37 : Variation du BER en fonction de la distance – Comparaison des deux scénarios

III.5.3 Comparaison sur le débit

L'impact du débit binaire sur la performance des deux topologies a également révélé des écarts importants. Dans le scénario 1 (topologie en étoile), le système offre une excellente stabilité jusqu'à 10 Gbit/s. Le Q-factor reste élevé (>10) et le BER reste inférieur à 10^{-28} , ce qui indique une transmission extrêmement fiable. À partir de 25 Gbit/s, on note une forte dégradation, avec un Q-factor qui chute à environ 1,8 et un BER qui dépasse les 10^{-2} , seuil critique. À 100 Gbit/s, la qualité de transmission devient inacceptable (œil fermé, BER élevé), montrant que le système atteint ses limites au-delà de 10 Gbit/s sans compensation optique.

Dans le scénario 2 (topologie en arbre), les résultats sont plus variables. Jusqu'à 10 Gbit/s, le système reste fonctionnel, bien que les valeurs de Q-factor soient légèrement inférieures (autour de 5,5) à celles du scénario 1. Toutefois, à partir de 25 Gbit/s, les performances se dégradent rapidement : le Q-factor chute vers 4, le BER devient significatif (10^{-5}), et les diagrammes de l'œil révèlent des distorsions importantes. À 100 Gbit/s, le BER atteint 1 et le Q-factor tombe à zéro, indiquant une transmission totalement inefficace.

Quel scénario supporte les débits élevés ?

Le scénario 1 est nettement plus performant pour les débits supérieurs à 5 Gbit/s. Il assure une transmission fiable jusqu'à 10 Gbit/s, ce qui le rend adapté aux services haut débit. Le scénario 2, quant à lui, se limite à des débits plus modestes, et devient instable dès que le débit dépasse 10 Gbit/s.

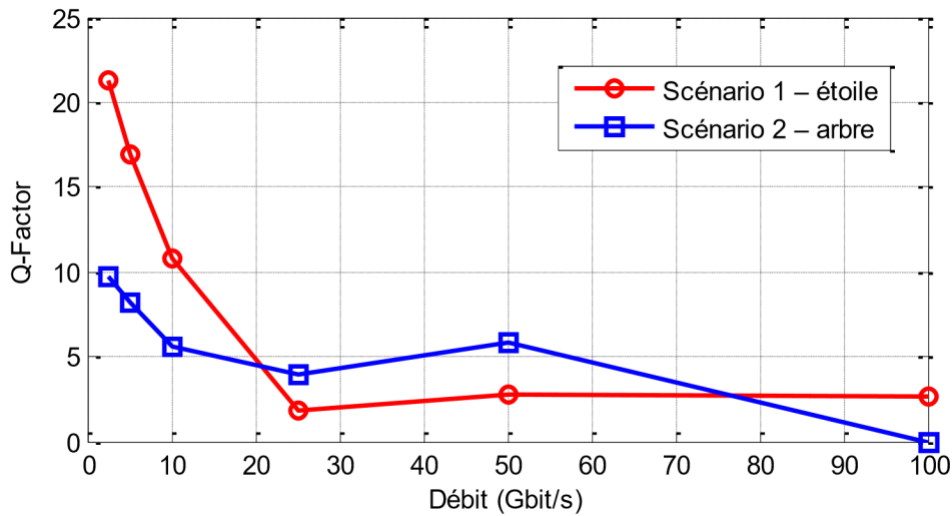


Figure III.38 : Variation du Q-factor en fonction du débit – Comparaison des deux scénarios

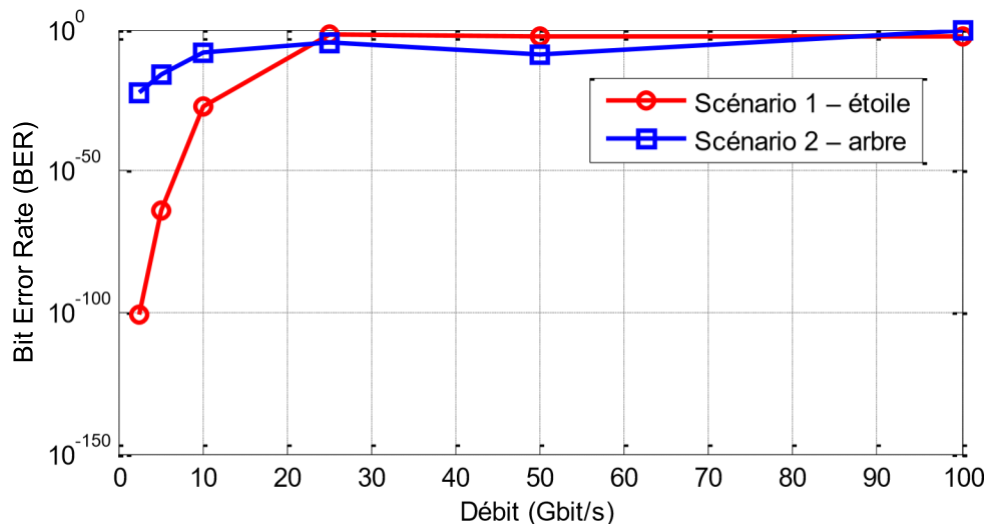


Figure III.39 : Variation du BER en fonction du débit – Comparaison des deux scénarios

III.5.4 Discussion technique

L'analyse comparative menée dans ce chapitre met en lumière les différences fondamentales entre les deux architectures WDM-PON étudiées, tant sur le plan théorique que pratique. Cette section propose une lecture approfondie des résultats précédents, en les replaçant dans le contexte des réseaux optiques modernes déployés par les opérateurs de télécommunications.

❖ Interprétation des différences techniques

Les écarts de performance observés entre la topologie en étoile (scénario 1) et la topologie en arbre (scénario 2) trouvent leur origine principalement dans les aspects architecturaux :

- La topologie en étoile repose sur un démultiplexage unique (1x4), ce qui limite les pertes optiques et simplifie la gestion du signal. Chaque utilisateur reçoit directement une longueur d'onde dédiée avec un minimum de composants intermédiaires.
- La topologie en arbre, quant à elle, utilise un démultiplexage hiérarchique (1x2 + 1x2), augmentant le nombre d'interfaces passives. Cette structure introduit des pertes cumulées, issues des jonctions et des composants répartiteurs, ce qui détériore rapidement la qualité du signal, notamment en longue distance ou à haut débit.

Du point de vue des composants, les deux scénarios n'utilisent que des éléments passifs (pas d'amplificateurs, pas de compensation de dispersion), mais leur organisation topologique a un impact direct sur le budget optique. Plus une architecture est complexe et ramifiée, plus elle est sensible à l'atténuation, aux interférences et aux limitations en puissance d'émission.

❖ Rôle des composants optiques passifs

Les différences de performance observées entre les deux scénarios s'expliquent aussi par le type et la disposition des composants optiques passifs utilisés dans chaque topologie.

- Dans la topologie en étoile, un seul démultiplexeur WDM 1x4 est utilisé pour distribuer les longueurs d'onde aux utilisateurs finaux. Ce composant, bien que passif, induit une perte d'insertion modérée et une dispersion limitée, ce qui permet de maintenir une bonne puissance optique à la sortie.
- En revanche, la topologie en arbre repose sur deux étages de démultiplexeurs WDM 1x2 en cascade, ce qui multiplie les sources de pertes optiques cumulées. Chaque jonction ajoute une perte d'insertion, une réflexion potentielle, et une tolérance de fabrication qui peut affecter la stabilité du signal. De plus, la multiplication des interfaces passives rend le système plus vulnérable aux variations environnementales (température, connectique, vieillissement).

Par ailleurs, aucun des deux scénarios n'intègre de composants actifs (tels que des amplificateurs optiques, égalisateurs, ou dispositifs de dispersion compensée), ce qui accentue la dépendance du système à la qualité et à la disposition des éléments passifs. Cette approche volontairement minimaliste a permis de mettre en évidence, de manière isolée, l'effet pur de la topologie et des composants passifs sur les performances.

❖ Avantages et inconvénients des deux topologies

Critère	Topologie en étoile (Scénario 1)	Topologie en arbre (Scénario 2)
Tolérance aux pertes	Excellente (faible perte optique globale)	Faible (pertes cumulées importantes)
Performance à longue distance	Jusqu'à 50 km sans amplification	Limitée à 10–25 km maximum
Support du haut débit	Jusqu'à 10 Gbit/s stable	Dégradation rapide au-delà de 5–10 Gbit/s
Complexité du réseau	Faible (architecture directe)	Moyenne (plusieurs étages de démultiplexage)

Évolutivité	Limitée au nombre de ports du démux	Bonne (ajout possible de branches hiérarchiques)
Coût d'implémentation	Réduit (moins de composants optiques)	Légèrement plus élevé (plus de composants passifs requis)

Tableau III.7 : Comparatif des avantages et inconvénients des deux scénarios WDM-PON

❖ Mise en perspective industrielle

Dans le monde réel, les opérateurs de réseaux optiques (comme Orange, Algérie Télécom, AT&T ou NTT) sont confrontés à des enjeux de performance, de coût et de flexibilité. Le choix entre une topologie en étoile ou en arbre n'est jamais anodin :

- La topologie en étoile est souvent préférée dans les environnements exigeants en termes de débit garanti par utilisateur (ex. : réseaux FTTH haut de gamme, réseaux d'entreprise, backbone d'accès). Elle est utilisée dans les zones urbaines denses où l'on peut justifier un investissement initial plus élevé pour un service plus fiable.
- La topologie en arbre est davantage adoptée dans les zones semi-urbaines ou rurales, où la réduction du coût de déploiement prime, même au prix d'un compromis sur la portée et la performance. Elle permet un partage optimisé des ressources optiques, mais reste plus sensible à la dégradation si aucune amplification ou régénération n'est prévue.

Cette étude illustre donc de façon rigoureuse que le choix d'une architecture WDM-PON doit toujours être guidé par un équilibre entre performance attendue, portée géographique, débit visé, et contraintes économiques. Elle offre aux ingénieurs télécoms un cadre d'aide à la décision pour orienter leurs choix en phase de conception ou d'extension de réseaux optiques d'accès.

III.6 Conclusion

Ce chapitre a présenté une étude approfondie de la performance de deux architectures WDM-PON à travers une série de simulations réalisées sous OptiSystem. L'objectif était de comparer la topologie en étoile, fondée sur un seul démultiplexeur 1x4, à une topologie en arbre hiérarchique, utilisant deux démultiplexeurs 1x2 en cascade, selon trois paramètres clés : la puissance d'émission, la distance de transmission, et le débit binaire.

Les résultats obtenus ont mis en évidence la supériorité de la topologie en étoile en termes de tolérance aux faibles puissances, de portée maximale, et de capacité à supporter des débits élevés. Cette configuration offre un bon compromis entre simplicité, efficacité énergétique et qualité de signal, sans nécessiter de composants actifs. À l'opposé, la topologie en arbre, bien qu'évolutive et économiquement intéressante pour des déploiements modulaires, s'avère beaucoup plus sensible aux pertes optiques, avec des performances limitées à des distances courtes et des débits modérés.

Ces conclusions prennent tout leur sens lorsqu'elles sont replacées dans le contexte des réseaux optiques d'accès déployés par les opérateurs télécoms. Dans la pratique, la topologie en étoile est souvent privilégiée pour les zones urbaines, où la densité d'utilisateurs et les exigences en qualité de service justifient des infrastructures plus robustes. À l'inverse, la topologie en arbre est utilisée dans les zones moins denses, où la mutualisation des équipements et la réduction des coûts priment sur les performances.

Ce travail constitue donc une base solide d'aide à la décision pour le dimensionnement des réseaux optiques passifs, en fournissant une analyse comparative claire, fondée sur des critères techniques et opérationnels. Il ouvre également la voie à de futurs travaux intégrant des composants actifs, des techniques de compensation optique, ou encore l'étude de réseaux hybrides WDM/TDM, pour répondre aux besoins croissants en bande passante et en flexibilité dans les architectures de télécommunication nouvelle génération.

Conclusion générale

À l'issue de cette étude, nous avons démontré la pertinence et l'efficacité de la fibre optique FTTH comme solution d'accès incontournable pour répondre aux besoins actuels et futurs en très haut débit. En nous appuyant sur une modélisation rigoureuse et une série de simulations réalisées sous OptiSystem, nous avons pu comparer deux scénarios architecturaux majeurs : la topologie en étoile et la topologie en arbre, toutes deux implémentées en technologie WDM-PON.

Les résultats obtenus mettent en lumière la supériorité de la topologie en étoile en termes de performance, de portée et de tolérance aux faibles puissances. Cette structure permet une distribution efficace des longueurs d'onde, une meilleure isolation entre les utilisateurs, et une qualité de transmission optimale jusqu'à 50 km. À l'inverse, la topologie en arbre, bien que plus économique, se révèle limitée par des pertes cumulatives importantes et une faible capacité à supporter de hauts débits sans amplification.

Ce travail a permis de :

- Valider expérimentalement les limites et avantages de chaque architecture en environnement simulé.
- Fournir des recommandations concrètes pour le choix d'une architecture FTTH adaptée à des contextes urbains variés.
- Faire le lien entre théorie, simulation et application réelle, en intégrant les contraintes techniques vécues dans le déploiement des réseaux optiques par les opérateurs télécoms.

En conclusion, ce projet constitue une contribution pragmatique et valorisante à l'étude des réseaux FTTH, à la fois pour la recherche académique et pour les besoins opérationnels du secteur industriel. Il ouvre également des perspectives d'amélioration future, notamment par l'introduction de composants actifs (amplificateurs EDFA, égalisateurs) ou par l'intégration de technologies hybrides WDM/TDM pour renforcer la capacité et la flexibilité des réseaux de nouvelle génération.

Références

- [1] Derbal, Ismail. *Evaluation de la transmission dans le sol des vibrations induites par une masse de réaction d'une table vibrante par les RNA*. Diss. 2018.
- [2] Sidi Ali Mebarek.Z Télécommunication optique 2001. Edition :2.11.4216 2.1-2.17.
- [3] GUERCH Azeddine Yahia, Ziane Aissa, « Déploiement d'un Réseau FTTx », Projet de fin d'études, Université Ziane Achour De DJELFA.
- [4] SAIDI, Riad. *Etude d'une Structure de Liaison par Fibre Optique : Caractérisation de la Propagation et Bilan Energétique*. Diss. Université Mohamed Khider–Biskra, 2010.
- [5] Colombier. F ; Pugnoud .C ; 2005 – « Réseaux et routage optique ».
- [6] DJAAFARI ABDELLAH, « Étude De La Propagation D'impulsions Ultra-courtes Dans Les Fibres Optiques Non linéaires Et Dispersives », Magister En Physique Théorique, L'université Aboubekr Belkaid De Tlemcen, 2011.
- [7] Kader, DAOUI Abdel. *Fibres optiques microstructurées : Modélisation et optimisation des propriétés optiques*. Diss. 2009.
- [8] Amaya, Mohammad. *Amélioration des performances d'un amplificateur optique à semiconducteurs par injection optique à la transparence du gain pour les réseaux de télécommunications optiques*. Diss. Brest, 2006.
- [9] Idir, Guettal, and Ifrihaddadene Adel. *Etude d'une liaison par fibre optique à haut débit" technologie WDM"*. Diss. Université Mouloud Mammeri, 2010.
- [10] Verneuil, Jean-Louis. "Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbits/s." *Université de Limoges, Limoges (2003) : 297*.
- [11] Celine Lacaux,op cit 96
- [12] KENGUNI, DJEN-MI. "Accès à la fibre optique par la population de Kinshasa à travers le réseau FttH." *Éducation et développement 1.23 (2019) : 17-17*.
- [13] Oussama, Khenniche Mohamed. "Etude comparative entre l'ADSL et la Fibre Optique."
- [14] ABDOULAYE HALIDOU Bachirou, KANTE Souleymane. "Etude et planification du réseau FTTH pour les transmissions optiques à haut débit." (2018).
- [15] Malika, Chaïbet. *Migration du réseau (RTC) vers les réseaux nouvelles générations (FTTX). Cas Algérie Télécom TO*. Diss. Université Mouloud Mammeri, 2017.
- [16] BECHAA, Romayssa. "Simulation d'un Réseau d'accès PON par VPI." (2022).
- [17] Saliou, Fabienne. *Etude des solutions d'accès optique exploitant une extension de portée*. Diss. Télécom ParisTech, 2010.