

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA
Faculty of Technology
Electronics Department



جامعة باجي مختار عنابة
كلية التكنولوجيا
قسم الإلكترونيك

Thèse

Présentée pour obtenir le diplôme de

Doctorat Troisième Cycle

Filière : Télécommunications

Spécialité : Télécommunications Optiques et Micro-Ondes

Par :

BOUKHATEM Nadira

Thème :

**Optimisation de la bande passante internet dans la
transmission vidéo par fibre optique en utilisant l'encodeur
H265/HEVC**

Thèse soutenue le 08/01/2026 devant le jury composé de :

N°	Nom et prénom	Grade	Etablissement	Qualité
01	GHERBI Soufiane	Prof.	Université Badji Mokhtar –Annaba	Président
02	MESSAOUDI Kamel	Prof	Université Cherif Messaadia –S.Ahras	Rapporteur
03	REDJATI Abdelghani	MCA	Université Badji Mokhtar -Annaba	Co-rapporteur
04	BOUKARI Karima	MCA	Université Badji Mokhtar -Annaba	Examineur
05	OUCHTATI Salim	Prof	Université 20 Aout 1955- Skikda	Examineur
06	Doghmane Hakim	MCA	Université 08/05/1945-Guelma	Examineur

Dédicaces

A toute ma famille,

A tous mes amis et collègues

A tous ceux qui me tiennent à cœur.

Remerciements

J'exprime toute ma gratitude à mon directeur de recherche, Professeur **MESSAOUDI Kamel**, pour son grand soutien dans la réalisation de ce travail par son soutien moral et technique ainsi que par sa disponibilité et pour la confiance qu'il m'a accordé, en m'encadrant ; tous ces facteurs ont grandement contribué à l'aboutissement de ce projet.

Je remercie le professeur **GHERBI Soufiane** Professeur, à l'Université de Badji Mokhtar –Annaba d'avoir fait l'honneur d'accepter la présidence de ma soutenance.

Je tiens à exprimer, tout particulièrement mes remerciements aux membres du jury,

Je remercie le Professeur **OUCHTATI Salim** d'être membre du jury.

Je remercie aussi le Professeur **DOGHMANE Hakim** d'avoir examiné mon travail.

Je remercie également le Docteur **BOUKARI Karima** d'avoir accepté de faire partie de ce jury.

Je remercie également le Docteur **REDJATI Abdelghani**, co-directeur de cette thèse, pour ses directives fructueuses et astucieuses, son aide pour le bon déroulement de cette thèse.

J'exprime toute ma gratitude à Madame **Fatima BRIK**, Maître de conférences -A- à l'Université de Badji Mokhtar –Annaba, pour sa générosité, pour sa contribution ainsi que son soutien durant la période de mes recherches.

Je suis également très reconnaissante à Monsieur **Salah TOUMI**, ex-directeur de laboratoire LERICA, pour son dévouement exemplaire à l'enseignement et à la recherche.

Je voudrais aussi remercier l'ensemble des membres du laboratoire LERICA ainsi qu'au personnel du Département d'Électronique de la Faculté de Technologie de l'Université de Badji Mokhtar –Annaba.

Enfin, j'aimerais remercier ma famille et en particulièrement mes parents qui m'ont toujours soutenue et encouragée, mon mari, mes enfants, mon frère, ma sœur et sa petite famille et tous mes amis pour leur soutien moral tout au long de ce travail.

Abstract

Thesis Title: Optimization of Internet Bandwidth in Video Transmission over Optical Fiber Using the HEVC/H.265 Encoder

This thesis addresses the challenge of optimizing the transmission of video streams encoded in H.265/HEVC over optical fiber. It argues that methods optimizing compression and transmission separately are suboptimal due to the complex interactions between HEVC encoder parameters and the characteristics of the optical channel.

The primary objective was to study this interaction and to demonstrate, through simulation, the benefits of a joint source–channel optimization. A progressive two-phase approach was adopted.

First, a joint optimization strategy was explored by enhancing HEVC intra-prediction (using Matlab) and integrating it with a high-performance optical transmission system based on OTDM and DPSK modulation (simulated in OptiSystem). Second, a fundamental analysis highlighted the impact of the HEVC CRF parameter on the bitrate–quality trade-off and the limitations (distance, dispersion, attenuation) of a basic optical link, confirming the necessity of an integrated approach.

Simulation results showed that prior optimization of the HEVC video stream significantly improved the performance (quality factor, bit error rate) of the OTDM-DPSK optical transmission compared to an unoptimized stream. The main contribution of this thesis lies in the simulation-based demonstration of the superiority of a joint optimization approach in enhancing spectral efficiency and reliability for HEVC video transmission over optical fiber. Although limited to simulation and specific aspects of HEVC and optical systems, this work emphasizes the relevance of source–channel co-design and opens perspectives for the development of more efficient multimedia communication systems.

Keywords: OTDM, HEVC, Intra prediction, bandwidth, CRF, Q-factor, SNR, and BER.

عنوان الأطروحة: تحسين عرض النطاق الترددي للإنترنت في نقل الفيديو عبر الألياف البصرية باستخدام المرمز HEVC/H.265

تعالج هذه الأطروحة إشكالية تحسين نقل تدفقات الفيديو المضغوطة بترميز H.265/HEVC عبر الألياف البصرية، حيث تؤكد أن الأساليب التي تقوم بتحسين الضغط والنقل بشكل منفصل ليست مثالية بسبب التفاعلات المعقدة بين معلمات المرمز HEVC وخصائص القناة البصرية.

كان الهدف الأساسي هو دراسة هذا التفاعل وإبراز، من خلال المحاكاة، الفوائد الناتجة عن تحسين مشترك بين المصدر والقناة. تم اعتماد نهج تدريجي من مرحلتين.

في المرحلة الأولى، تم اقتراح استراتيجية تحسين مشترك من خلال تحسين التنبؤ الداخلي لترميز HEVC باستخدام (Matlab) وربطه بنظام إرسال بصري عالي الأداء يعتمد على تقنية OTDM والتضمين DPSK تمت محاكاته باستخدام برنامج (OptiSystem). أما في المرحلة الثانية، فقد أظهرت تحليلات أساسية تأثير معامل CRF الخاص ب HEVC على التوازن بين الجودة ومعدل البت، إضافة إلى قيود قناة الألياف مثل المسافة، التشتت، والتوهين، مما يؤكد ضرورة اتباع نهج متكامل.

أظهرت نتائج المحاكاة أن تحسين تدفق الفيديو HEVC مسبقاً أدى إلى تحسين ملحوظ في أداء نظام النقل البصري (OTDM-DPSK من حيث عامل الجودة ومعدل الخطأ). وتتمثل المساهمة الرئيسية لهذه الأطروحة في إثبات تفوق نهج التحسين المشترك، من خلال المحاكاة، في تحسين الكفاءة الطيفية وموثوقية نقل الفيديو عبر الألياف البصرية. وعلى الرغم من اقتصارها على المحاكاة وبعض الجوانب الخاصة ب HEVC والأنظمة البصرية، إلا أن هذه الدراسة تبرز أهمية التصميم المشترك للمصدر والقناة، وتفتح آفاقاً لتطوير أنظمة اتصالات وسائط متعددة أكثر كفاءة.

الكلمات المفتاحية: تقسيم الزمن المتعامد (OTDM)، ترميز HEVC، التنبؤ الداخلي، عرض النطاق الترددي، عامل CRF، عامل الجودة (Q-factor)، نسبة الإشارة إلى الضوضاء (SNR)، ومعدل الخطأ في البتات (BER)

Résumé

Intitulé de la thèse : Optimisation de la bande passante internet dans la transmission vidéo par fibre optique en utilisant l'encodeur HEVC/H265

Cette thèse aborde la problématique de l'optimisation de la transmission de flux vidéo encodés en H.265/HEVC via la fibre optique, en soutenant que les méthodes optimisant séparément la compression et la transmission ne sont pas idéales en raison des interactions complexes entre les paramètres de l'encodeur HEVC et les caractéristiques du canal optique.

L'objectif primordial était d'étudier cette interaction et de montrer, par simulation, les bénéfices d'une optimisation conjointe source-canal. On a opté pour une approche progressive en deux phases.

Premièrement, une stratégie d'optimisation conjointe a été envisagée en perfectionnant l'intra-prédiction HEVC (via Matlab) et en l'associant à un système de transmission optique performant basé sur OTDM et la modulation DPSK (simulé sous OptiSystem). En second lieu, une analyse fondamentale a mis en évidence l'influence du paramètre CRF de HEVC sur le compromis débit/qualité et les limitations (distance, dispersion, atténuation) d'une liaison optique simple, confirmant la nécessité d'une approche intégrée.

Les résultats de simulation ont démontré que l'optimisation préalable du flux vidéo HEVC améliorerait significativement les performances (facteur de qualité, taux d'erreur binaire) de la transmission optique OTDM-DPSK comparativement à un flux non optimisé. Ainsi, La contribution majeure de cette thèse réside, dans la démonstration par simulation de la supériorité de l'approche d'optimisation conjointe pour améliorer l'efficacité spectrale et la fiabilité de la transmission vidéo HEVC sur fibre optique. Bien que limités à la simulation et à des aspects spécifiques de HEVC et des systèmes optiques, ces travaux soulignent la pertinence du co-design source-canal et ouvrent des perspectives pour le développement de systèmes de communication multimédia plus performants.

Mots clés : OTDM, HEVC, Intra prédiction, bande passante, CRF, Q-factor, SNR et BER

Table des Matières

Introduction Générale	01
Chapitre 1 : Les Techniques et les Eléments Constitutifs des Systèmes de Transmission Optiques Dédiés à la Transmission Vidéo	
1. 1 Introduction	04
1. 2 Généralités sur les Systèmes Optiques	04
1.2.1 Les systèmes optiques	04
1.2.2 Principes de mise en place d'un réseau	06
1.2.3 Aspects des réseaux de télécommunications	06
1.2.4 Description des réseaux d'accès optiques	08
1. 3 Transmissions optiques dans les réseaux de courtes distances.....	08
1.3.1 Technologie FTTx	09
1.3.2 Topologie des réseaux	10
1.3.3 Transmissions optiques dans les réseaux de moyennes et longues distances.....	11
1. 4 Techniques de multiplexage	12
1.4.1 Le multiplexage temporel (TDM, Time Division Multiplexing)	13
1.4.2 Le multiplexage en longueur d'onde (WDM)	13
1. 5 Architecture générale d'une liaison optique	14
1.5.1 Transmetteurs optiques	16
1.5.1.1 Sources lumineuses	16
A. La diode laser	17
B. La LED	18
1.5.1.2 Modulation optique	18
A. Modulation directe	19
B. Modulation externe	19
1.5.1.3 Formats de modulations	24
a. Format OOK	24
b. Formats de modulation d'ordre supérieur	24
1.5.2 Canal de transmission optique	25
1.5.2.1 Généralités sur la fibre optique	26
1.5.2.2 Les contraintes via les effets linéaires et non linéaires	27
1.5.2.2.1 Effets linéaires	27
A. Atténuation	27
B. La Dispersion	28
a. La dispersion intermodale	29
b. Dispersion intramodale	30
c. Dispersion du mode de polarisation (PMD)	30
1.5.2.2.2 Effets non linéaires	31
A. L'effet Kerr	32
a. Auto-modulation de phase	32
b. Modulation de phase croisée (cross-phase modulation)	33
c. Mélange à quatre ondes (Four Wave Mixing)	34
B. Diffusions Raman et Brillouin stimulées	35
1.5.2.3 Les techniques de transmissions	35
A. Formats de modulations	36
a. Modulation et Démodulation des signaux optiques DPSK	36

b. Codage duobinaire du signal DPSK	36
B. La technique OTDM: Optical Time Division Multiplexing	37
1.5.2.4 Analyse du Signal vidéo entièrement optique dans les systèmes OTDM/DPSK	38
1.5.3 Récepteurs optiques	40
1.5.3.1 Détection directe	42
1.5.3.2 Détection cohérente	42
1.5.4 Les facteurs de qualité d'une transmission	42
1.6 Conclusion	44
Chapitre 2 : Les encodeurs vidéo et la bande passante internet	
2.1 Introduction	45
2.2 Travaux connexes.....	46
2.3 Formats de représentation vidéo et Compression.....	47
2.3.1 Format des vidéos numériques.....	47
2.3.2 Les espaces de couleurs.....	48
2.3.3 Concepts de Base en Compression Vidéo.....	48
2.3.4 Décomposition et partitionnement du signal vidéo.....	49
2.3.5 Techniques de compression.....	49
2.3.6 Principe de codage vidéo.....	50
2.3.7 Les Types d'encodeurs vidéo.....	50
2.3.7.1 Normes et standards.....	51
2.3.7.2 Évolution des Normes de Compression Vidéo.....	51
2.4 H.265/HEVC	52
2.4.1 Aperçu de la norme de codage vidéo.....	52
2.4.2 Structuration de la norme HEVC.....	53
2.4.2.1 Profils.....	53
2.4.2.2 Niveaux.....	53
2.4.2.3 Configurations.....	53
2.4.3 Structure de codage.....	54
2.4.4 Généralité sur la prédiction du HEVC.....	54
2.5 Prédiction Intra.....	55
2.5.1 Génération d'Échantillons de Référence.....	57
2.5.2 Intra Prédiction Angulaire.....	58
2.5.3 Intra prédiction plane (Planar).....	59
2.5.4 DC Intra prédiction.....	60
2.5.5 Importance du lissage des limites dans le post-traitement du HEVC.....	60
2.5.6 Description de la Décision en mode de Prédiction Intra dans HEVC.....	61
2.6 Techniques de prédictions intra dans les encodeurs vidéo.....	62
2.7 Importance de la Compression Vidéo pour optimiser la bande passante internet.....	63
2.7.1 Relation entre module d'intra prédiction du HEVC et la bande passante internet.....	64
2.7.2 Le rôle du HEVC dans l'optimisation de la bande passante.....	64
2.8 Conclusion.....	65
Chapitre 3 : Evaluation des paramètres des systèmes de transmissions optiques implémentés pour des flux vidéo	
3.1 Introduction.....	66
3.2 Optimisation du codage de la source en utilisant différents niveaux et paramètres de l'encodeur	

HEVC.....	66
3.3 L'approche proposée	67
3.3.1 Mise en œuvre de la décision étape 1.....	68
(a) Calcul rapide de la complexité locale.....	68
(b) Classification de la CU et Décision rapide de modes de prédiction.....	69
(c) Décision rapide basée sur la magnitude du gradient de Sobel.....	69
3.4 Méthodologie.....	71
3.5 Résultats et discussion	73
3.5.1 Les Mesures de test.....	73
3.5.2 Influence du contenu vidéo.....	74
3.5.3 Analyse comparative des modes en fonction du PSNR et du SNR.....	76
3.5.4 Analyse globale des performances	78
3.6 Conception d'une architecture de transmission OTDM des séquences vidéo.....	83
3.7 Principes de fonctionnement du modèle proposé.....	85
3.8 Environnement de co-simulation	89
3.8.1 Optimisation conjointe du codage vidéo et la liaison optique.....	89
3.8.2 Intégration des données vidéo compressées dans le système optique.....	89
3.9 Interprétation des résultats expérimentaux.....	90
3.9.1 Analyse de l'impact de la puissance laser émise sur la qualité de transmission...	90
3.9.2 Influence de la distance sur les formats DPSK-RZ et DPSK-NRZ.....	90
3.9.3 Analyse spectrale du signal reçu.....	92
3.9.4 Evaluation de l'architecture OTDM proposée.....	93
3.10 Conclusion.....	95
Chapitre 4 : Étude de l'Impact du CRF et Comparaison Critique des Approches Expérimentales	
4.1 Introduction.....	97
4.2 Fondements Théoriques et État de l'Art	97
4.3 Méthodologie de l'étude	98
4.4 Plateforme expérimentale et outils	98
4.4.1 Logiciels utilisés	99
4.4.2 Désignation d'Ensembles de Données.....	100
4.4.3 Sélection du paramètre de compression.....	101
4.4.4 Extraction des Courbes représentatives.....	102
4.4.5 Obtention du Débit Binaire.....	102
4.5 Discussion et évaluation des résultats de la première partie.....	102
4.5.1 Analyse de la Relation Débit-PSNR.....	102
4.5.1.1 Perspectives générales.....	103
4.5.1.2 Comparaison des séquences.....	104
4.5.2 Analyse de la Relation Débit-CRF.....	104
4.5.2.1 Sensibilité au CRF par séquences.....	105
4.5.2.2 Rendement de compression pour divers niveaux de CRF.....	105
4.5.3 Impact du Contenu Vidéo sur l'Efficacité de Compression.....	105
4.5.3.1 Caractéristiques du contenu et compressibilité.....	106
4.5.3.2 Sélection adaptative du CRF selon la nature du contenu vidéo.....	106
4.6 Synthèse des analyses et perspectives de recherche.....	106
4.7 Configuration de la liaison optique simulée (sous OptiSystem)deuxième partie.....	

4.7.1	Simulation d'une liaison par fibre optique pour un canal classique.....	107
4.7.2	Analyse de la Performance à 10 Gbps.....	107
4.7.3	Impact du Débit Binaire sur le Facteur Q.....	110
4.7.4	Impact du Débit Binaire sur le BER.....	110
4.7.5	Evaluation de la Chaîne de Transmission Optique Simple.....	112
4.8	Influence combinée du CRF et des conditions de la liaison optique.....	112
4.8.1	interprétation des observations, limites de l'étude.....	113
4.8.2	Analyse de l'efficacité du CRF comme outil de compromis qualité-débit.....	113
4.8.3	Impact de la longueur de la fibre comme facteur limitant.....	113
4.8.4	Relation entre compression vidéo et performance de transmission.....	114
4.9	Conclusion.....	114
Conclusions et perspectives		116
Bibliographie		

Liste des Figures

Figure 1.1 Schéma synoptique d'une chaîne de transmission optique.....	6
Figure 1.2 Différentes parties des réseaux publics.....	7
Figure 1.3 Infrastructure FTTx	10
Figure 1.4 Développement des normes PON dans l'ITU-T et l'IEEE.....	11
Figure 1.5 Principe du multiplexage.....	12
Figure 1.6 Principe de multiplexage à répartition temporelle TDM.....	13
Figure 1.7 Architecture de base d'un réseau WDM.....	14
Figure 1.8 Schéma synoptique d'une transmission optique.....	15
Figure 1.9 Schéma de fonctionnement d'un système de communication optique.....	16
Figure 1.10 Processus opérationnel du laser.....	17
Figure 1.11 Principe de fonctionnement d'un laser.....	17
Figure 1.12 Structure de la diode laser VCSEL.....	18
Figure 1.13 Classification des modulations optiques.....	19
Figure 1.14 Aperçu de la modulation directe.....	19
Figure 1.15 Synoptique de la modulation externe.....	20
Figure 1.16 Structure géométrique du modulateur EAM via du LASER.....	20
Figure 1.17 Différentes configurations du MZI.....	21
Figure 1.18 Concept fondamental d'un MMZ.....	22
Figure 1.19 Principe du format OOK (On-Off Keying).....	24
Figure 1.20 Représentation des symboles des différents niveaux du format de modulation.....	25
Figure 1.21 (a) Tracé d'indice de réfraction, (b) Section des couches physiques d'une fibre à saut d'indice	26
Figure 1.22 Classification des fibres optiques.....	26
Figure 1.23 Synthèse des effets linéaires et non linéaires.....	27
Figure 1.24 Fenêtres de transmission des fibres optiques.....	28
Figure 1.25 L'évolution de l'impulsion optique lors de la transmission.....	29
Figure 1.26 Dispersion dans la fibre.....	30
Figure 1.27 Représentation de l'effet d'auto modulation de phase.....	33
Figure 1.28 Modulation de phase croisée.....	33
Figure 1.29 Les composantes de fréquence résultantes dues au FWM (a) deux signaux d'entrées ω_1 et ω_2 (b) trois signaux d'entrées ω_1 , ω_2 et ω_3	34
Figure 1.30 Schéma général Modulation du signal DPSK.....	36
Figure 1.31 Codage en transmission DPSK.....	37
Figure 1.32 Système d'émission et réception de l'OTDM.....	38
Figure 1.33 Concept de la technique OTDM avec accentuation de la diaphonie.....	38
Figure 1.34 Schéma fonctionnel simplifié, d'un récepteur de détection directe générique et d'un circuit de décision juste après le démultiplexage.....	41
Figure 2.1 Format des sous-échantillonnages.....	43
Figure 2.2 Structure d'un groupe d'image.....	49
Figure 2.3 Processus de compression/décompression vidéo.....	50

Figure 2.4 Evolution des codeurs vidéo.....	52
Figure 2.5 Les fluctuations de débit pour les normes vidéo.....	52
Figure 2.6 schéma fonctionnel d'un encodeur HEVC avec décodeur intégré.....	53
Figure 2.7 Configuration principale du HEVC.....	54
Figure 2.8 Partitionnement dans la norme HEVC.....	55
Figure 2.9 Organigramme de la Prédiction Intra dans HEVC.....	57
Figure 2.10 Les 33 directions disponibles en prédiction Intra.....	57
Figure 2.11 Échantillons de référence $R(x, y)$	58
Figure 2.12 Intra prédiction plane 4×4	60
Figure 2.13 Schéma complet de l'intra prédiction dans HEVC.....	62
Figure 3.1 Schéma bloc du codec hybride H.265/HEVC.....	69
Figure 3.2 Séquences d'entrée utilisées a) Beauty b) Bosphorus c) Jockey d) ReadySteadyGo e) YatchRide.....	73
Figure 3.3 Diagramme de flux de prédiction intra pour toutes les tailles de PU et tous les modes de prédiction.....	74
Figure 3.4 Trame de sortie compressée pour différent modes.....	79
Figure 3.5 PSNR pour 35 modes d'intra prédiction.....	81
Figure 3.6 SNR pour 35 modes d'intra prédiction.....	83
Figure 3.7 Taux de compression pour 35 modes de prédiction intra.....	84
Figure 3.8 Schéma de principe d'une liaison optique.....	86
Figure 3.9 Modèle proposé du système de transmission vidéo par fibre optique.....	87
Figure 3.10 Schéma d'une liaison optique OTDM.....	90
Figure 3.11 Schéma d'une liaison DPSK.....	90
Figure 3.12 Schema du bloc subsystem 3(DPSK).....	90
Figure 3.13 (a), (c), (b), (d) Facteur de qualité et logarithme du taux d'erreur binaire par rapport à la puissance laser transmise de CW pour la modulation RZ et NRZ.....	93
Figure 3.14 (e), (f) Facteur de qualité et logarithme du taux d'erreur binaire en fonction de la distance de transmission du 4 ^{ème} canal pour les systèmes DPSK -NRZ et DPSK-RZ.....	93
Figure 3.15 (g), (i), (h), (j) Facteur de qualité et logarithme du taux d'erreur binaire en fonction de la distance de transmission du système proposé.....	94
Figure 3.16 Spectre reçu (1) RZ, (2) NRZ.....	95
Figure 3.17 BER vs SNR curve for different video scenes.....	96
Figure 3.18 BER vs intra prediction mode curve for Bosphorus video scene.....	96
Figure 3.19 BER en fonction de la bande passante du filtre (BP) : (a) pour différents utilisateurs ; (b) pour un utilisateur pour différentes distances.....	97
Figure 4.1 Organigramme de la méthodologie.....	100
Figure 4.2 Schéma de l'interface FFMPEG.....	101
Figure 4.3 Conversion du format des vidéos	102
Figure 4.4 Débit en fonction du PSNR	105
Figure 4.5 Débit en fonction du CRF.....	106
Figure 4.6 Schéma de base d'une liaison optique.....	108
Figure 4.7 Influence de la longueur de la fibre optique sur le BER et Q.....	109

Figure 4.8 Les diagrammes de l'oeil en fonction de la distance de SMF pour un débit de 10 Gb	110
Figure 4.9 Influence du débit sur le facteur Q.....	111
Figure 4.10 Influence du débit sur le facteur BER.....	112
Figure 4.11 Les diagrammes de l'oeil en fonction de la distance de SMF pour un débit de 40 Gb.....	113
Figure 4.12 Les diagrammes de l'œil en fonction de la distance de SMF pour un débit de 100 Gb.....	113

Liste des Tableaux

Tableau 1.1 Différence entre Unicast, Multicast et Broadcast.....	7
Tableau 1.2 Classification des réseaux d'accès	8
Tableau 1.3 Comparaison de certaines technologies FTTX.....	10
Tableau 1.4 Caractéristiques des différents modes WDM les plus répandus.....	14
Tableau 1.5 Comparaison des propriétés entre les deux familles de fibre.....	27
Tableau 2.1 Les paramètres des formats vidéo numériques standard	47
Tableau 2.2 Norme de compression vidéo	51
Tableau 2.3 La relation entre le numéro de mode intra prédiction et son nom associé	56
Tableau 3.1 Description des séquences vidéo utilisées.....	73
Tableau 3.2 Différent Taux de compression pour différentes séquences vidéo.....	76
Tableau 3.3 Différents taux de PSNR et de SNR.....	78
Tableau 3.4 Les paramètres de la simulation.....	89
Tableau 3.5 Paramètres de l'EDFA.....	89
Tableau 3.6 Paramètres du MZDI.....	89
Tableau 3.7 Paramètres du LPF.....	89
Tableau 4.1 Les résultats de compression en utilisant lib265 du logiciel FFMPEG avec différents CRF.	104
Tableau 4.2 les caractéristiques de la fibre SMF utilisée.....	109

Liste des Abréviations

AAC	Advanced audio coding
AON	Active Optical Network
ASE	Amplified Spontaneous Emission
ASO	Arbitrary Slice Ordering
AWG	Arrayed Waveguide Grating
BER	Bit Error Rate
CATV	Cable Television
CD	Chromatic Dispersion
CW	Continuous Wave
DCF	Dispersion Compensating Fiber
DCT	Discrete Cosine Transform
DFB	Distributed Feed Back
DPSK	Differential Phase Shift Keying
DSL	Digital Subscriber Line
DSP	Digital Signal Processing
EAM	Electro-Absorption Modulator
EDFA	Erbium-Doped Fiber Amplifier
FAI	Les fournisseurs d'accès Internet
FMO	Flexible Macrobloc ordering
FPGA	Field Programmable Gate Array
FPS	Frame Per Second
FTTx	Fiber To The x
FWM	Four Wave Mixing
GOP	Group of picture
GVD	Group Velocity Dispersion
HDL	Hardware Description language
HD	Haute Definition
HEVC	High Efficiency Video Coding

ISO/IEC International Organization for Standardization/International Electrotechnical Commission

ITU-T International Telecommunication Union

JCT-VC Joint Collaborative Team on Video Coding

MPEG Moving Picture Experts Group

LAN Local Area Network

LO Local Oscillator

LUT Look Up Table

MAN Metropolitan Area Network

MZDI Mach Zehnder Delay Interferometer

MZM Mach-Zehnder Modulator

NRZ Non-Return to Zero

OFDM Orthogonal Frequency-Division Multiplexing

OLT Optical Line Terminal

ONU Optical Network Unit

ONT Optical Network Terminal

OSNR Optical Signal-to-Noise Ratio

OTDM Optical Time Division Multiplexing

PM Phase Modulator

PMD Polarisation Mode Dispersion

PON Passive Optical Network

PSNR Peak Signal to Noise Ratio

QAM Quadrature amplitude modulation

Q-factor Quality Factor

QPSK Quadrature Phase-Shift Keying

QoS Qualité de service

RDO Rate Distorsion Optimization

SAD Sum of Absolute Differences

SMF Single Mode Fiber

SNR Signal-to-Noise Ratio

SPM Self Phase Modulation
TDM Time Division Multiplexing
TVHD télévision numérique haute définition
VCSEL Vertical Cavity Surface Emitting Laser
VOD Video on Demand
WAN Wide Area Network
WDM Wavelength Division Multiplexing
XPM Cross-Phase Modulation

Introduction Générale

Nous vivons une époque caractérisée par une connectivité universelle et une consommation record d'informations numériques. Au centre de cette révolution numérique, le contenu vidéo a pris sa place en tant que principale force sous-jacente à la croissance exponentielle du trafic dans les réseaux de télécommunications mondiaux. Des plateformes de streaming offrant des résolutions de plus en plus élevées (Haute Définition, Ultra-Haute Définition, 4K, 8K) aux applications de visioconférence vitales pour le travail et la vie sociale, en passant par l'avènement de la réalité virtuelle et augmentée, la vidéo est aujourd'hui la partie la plus importante et la plus dynamique du flux de données partagé. La domination de la vidéo impose une limitation sévère et constante des infrastructures réseau, exigeant progressivement des capacités de transmission plus élevées ainsi qu'une meilleure efficacité.

Dans le but de faire face au déluge d'informations, les réseaux de fibres optiques sont devenus l'infrastructure de choix, servant de colonne vertébrale fondamentale nécessaire pour transmettre ces vastes volumes d'informations à travers le monde. En raison de leurs excellentes caractéristiques physiques caractérisées par une bande passante théorique presque illimitée, une faible atténuation du signal sur de longues distances et une immunité élevée aux interférences électromagnétiques, les fibres optiques sont devenues la technologie de choix pour les réseaux d'accès (FTTH), les réseaux métropolitains (MAN) et les réseaux de transport longue distance (WAN). Elles seules semblent capables de soutenir durablement l'évolution des applications et l'explosion des débits requis par les applications multimédias actuelles et émergentes.

Face à cette complexité et aux limites intrinsèques des approches disjointes, l'hypothèse centrale qui motive cette thèse est qu'une optimisation conjointe et synergique de la compression vidéo HEVC et de la transmission sur fibre optique est non seulement possible, mais nécessaire pour atteindre des niveaux de performance supérieurs. L'idée fondamentale est de considérer le système "source vidéo - encodage - canal optique - décodage - utilisateur final" comme un tout intégré, plutôt qu'une simple cascade de blocs indépendants. En tenant compte simultanément des contraintes et des leviers d'optimisation à chaque étape, il deviendrait possible d'exploiter les complémentarités et d'atténuer les interférences pour maximiser l'efficacité spectrale globale, la robustesse de la transmission et la qualité d'expérience de l'utilisateur.

Cette approche d'optimisation conjointe, souvent désignée sous le terme de co-design source-canal, n'est pas nouvelle en théorie des communications, mais son application spécifique au couple HEVC/fibre optique, en tenant compte des détails fins de l'encodage et des particularités de la propagation optique moderne, représente un champ d'investigation encore largement ouvert et pertinent.

L'objectif principal de cette thèse est donc d'étudier en profondeur l'interaction complexe entre les mécanismes de compression du standard HEVC et les caractéristiques de la transmission sur fibre optique, et de proposer et évaluer des approches permettant une optimisation conjointe de ces deux domaines. Il s'agit de démontrer qu'en adaptant intelligemment les paramètres de l'encodage vidéo en fonction des conditions de transmission optique (et potentiellement vice-versa, bien que cet aspect soit moins exploré ici), il est possible d'obtenir des gains significatifs par rapport aux méthodes traditionnelles où compression et transmission sont optimisées indépendamment.

Pour atteindre cet objectif ambitieux, nous avons adopté une démarche méthodologique progressive et structurée, s'appuyant sur des outils de simulation reconnus dans leurs domaines respectifs (Matlab pour le traitement et l'encodage vidéo, OptiSystem pour la simulation des systèmes de communication optique). Cette démarche s'articule autour de deux investigations complémentaires, qui ont chacune fait l'objet de travaux spécifiques et de publications :

1. Une première investigation fondamentale : Forts des enseignements de la première phase, nous avons exploré une voie d'optimisation conjointe plus sophistiquée. D'une part, nous avons affiné l'optimisation au niveau de l'encodage HEVC en nous concentrant sur le module d'intra-prédiction. D'autre part, nous avons conçu un système de transmission optique plus performant, basé sur le multiplexage temporel (OTDM) et une modulation robuste (DPSK). L'étape cruciale a été de coupler ces deux éléments en simulant la transmission du flux vidéo optimisé sur le système optique avancé, afin d'évaluer les bénéfices de cette approche conjointe.

2. Une seconde investigation orientée solution : Celle-ci visait à caractériser précisément l'impact des paramètres clés de chaque domaine pris isolément, mais dans la perspective de leur interaction future. Nous avons ainsi analysé l'influence du paramètre CRF (Constant Rate Factor) de HEVC sur le compromis débit/qualité, et étudié les limitations imposées par la distance de transmission sur une liaison optique simple non compensée. Cette étape a permis de poser les bases, de quantifier les ordres de grandeur et de confirmer la nécessité d'une approche intégrée.

Cette thèse s'organise logiquement pour présenter cette démarche et ses résultats. Après cette introduction générale qui pose le contexte, la problématique et les objectifs, les chapitres suivants détailleront les fondements théoriques de la compression vidéo HEVC et de la transmission optique,

Ce manuscrit de thèse s'articule autour de quatre chapitres et se termine par une conclusion générale :

- Le **premier chapitre**, explore tous les composants et techniques de transmission optique, à commencer par la source lumineuse et les techniques de modulation qui intègrent des données binaires sous forme de signaux électriques et d'ondes lumineuses. Nous introduisons également la fibre optique comme support de transmission en expliquant les effets linéaires et non linéaires qui affectent le signal transmis et le récepteur. Nous discutons également du fonctionnement des composants de multiplexage OTDM, et enfin nous mettons en évidence les techniques utilisées dans la transmission vidéo.
- Dans le **second chapitre**, nous discuterons des différents aspects des systèmes optiques dédiés pour les transmissions vidéo, en s'appuyant sur un état de l'art des travaux antérieurs et les avancées en matière de traitement et de compression vidéo. Ce chapitre détaillera les différentes méthodes et techniques de transmission de flux vidéo, y compris les protocoles de transport de vidéo sur internet ; examine les avantages et limites de chaque approche, tout en identifiant les leviers d'optimisation pour réduire la congestion réseau. Il aborde aussi les bases du traitement d'image et de vidéo, et les principes de la compression, notamment via le standard HEVC. Il détaille les modes de codage pertinents pour les objectifs de recherche, en soulignant l'intérêt de l'encodeur HEVC dans l'optimisation de la bande passante sur fibre optique. Le choix de la technologie intra prédiction pour la compression est justifié, en lien avec les besoins de transmission optique. Enfin, une étude des chaînes de transmission est réalisée, accompagnée de la

définition des outils nécessaires pour une implémentation matérielle et d'une modélisation du flot de conception sur Optisystem.

- **Le troisième chapitre** mettra en valeur notre méthodologie d'implémentation du module intra prédiction pour l'encodeur H.265/HEVC sur une plateforme Matlab. Nous détaillerons les différentes optimisations appliquées afin d'améliorer la vitesse d'encodage du module, et d'accélérer la procédure de décision du meilleur mode de prédiction tout en gardant la même performance d'encodage en termes de qualité vidéo et débit de compression. Ensuite, une deuxième implémentation du module où nous intégrons la technique OTDM-DPSK. Nous présentons d'abord la technique OTDM dans la transmission vidéo optique ainsi que ses architectures. Puis nous confrontons les résultats de simulation du système proposé par les paramètres d'optimisation, et nous évoquons l'impact de la compression face aux performances.
- **Le quatrième chapitre**, examine l'interaction entre les paramètres de compression vidéo et l'efficacité d'une transmission via fibre optique. L'accent est mis sur l'utilisation du Constant Rate Factor (CRF) comme levier de contrôle du débit binaire tout en préservant une qualité visuelle satisfaisante. Parallèlement, une analyse de la chaîne optique est effectuée pour mesurer l'effet de la longueur de fibre sur les critères de qualité de transmission tels que le facteur Q et le taux d'erreur binaire (BER), sans amplification ni compensation. Le but est d'étudier comment le perfectionnement des paramètres de compression peut contribuer à améliorer l'efficacité générale du système de transmission.

Nous terminons notre travail par une présentation détaillée des méthodologies et des résultats issus de nos deux investigations successives, discussion approfondie des résultats, en mettant en évidence leurs implications et leurs limites et nous clôturons par une conclusion générale qui synthétise les apports de la thèse et ouvre des perspectives pour de futurs travaux.

Chapitre 1 : Les Techniques et les Éléments Constitutifs des Systèmes de Transmission Optiques Dédiés à la Transmission Vidéo

1. 1 Introduction

A mesure que le processus de télécommunications a évolué et que la technologie a dépassé la diffusion analogique et l'a remplacée par la diffusion numérique, la transmission et la réception d'informations et de données (texte, image, vidéo) ont atteint des vitesses de plus de milliers de kilomètres, éliminant ainsi tous les tracas liés aux déplacements pendant la transmission. En-effet, les systèmes de transmission par fibres optiques constituent la technologie la plus répandue et la plus dynamique dont la conception nécessite une compréhension des caractéristiques de fonctionnement des sous-composants impliqués.

Le monde d'aujourd'hui est témoin de progrès extrêmement impressionnants dans les télécommunications en général et dans la transmission optique en particulier. Les systèmes optiques dédiés pour les transmissions vidéo offrent une qualité de transmission élevée, une faible latence, une grande bande passante, une compression efficace des données vidéo et une fiabilité élevée, ce qui les rend particulièrement adaptés aux applications de diffusion vidéo sur réseaux filaires et sans fil. Ce développement révolutionne le domaine des télécommunications et de l'internet haut débit, où les débits peuvent atteindre 1Tbit/s. Actuellement, Il existe plusieurs types de transmissions vidéo, chacun avec ses avantages et ses inconvénients, et le choix dépendra des besoins spécifiques de chaque application.

Dans ce chapitre, nous aborderons des concepts généraux concernant l'évolution des réseaux de communications optiques. Dans la première section, nous allons également rappeler les exigences et les applications des transmissions vidéo. Par la suite, nous aborderons les méthodes d'accès optique et nous rappellerons les diverses architectures et technologies de multiplexage. Ensuite, nous proposons une étude approfondie des outils de simulation ou diverses combinaisons des composants optoélectroniques, techniques de modulation et de multiplexage dont il est important d'en tenir compte pour atteindre les résultats de liaison souhaitées. Ce chapitre vise à fournir des informations générales sur les aspects physiques et fonctionnels des systèmes de communication optique en présentant leurs différents composants et les technologies correspondantes. Nous introduisons la fibre optique étant le moyen de transmission. Enfin, nous étudions en parallèle le fonctionnement des dispositifs de multiplexage et à la fin nous nous concentrons sur les méthodes employées lors de la transmission vidéo.

Il convient de noter qu'il y a plusieurs variétés de composants optiques offerts sur le marché pour effectuer la même tâche, mais nous limitons notre champ d'application aux composants qui seront utilisés dans ce travail.

1. 2 Généralités sur les Systèmes Optiques

1.2.1 Les systèmes optiques

L'évolution d'Internet vers des réseaux capables de fournir des services multimédias de haute qualité nécessite l'adoption de protocoles pouvant répondre aux exigences spécifiques de ces derniers [1]. Ils nécessitent généralement des délais de transmission et une bande passante considérables, ainsi que des applications IP qui ont des limitations différentes. Par conséquent, toute détérioration des conditions de transmission peut entraîner une diminution significative de la qualité des services multimédia. Dans ce contexte plusieurs études dans la littérature proposent des méthodes pour résoudre ces problèmes. Les auteurs dans [2] ont présenté une étude dont un fichier vidéo doit subir un prétraitement avant sa diffusion par le biais d'un réseau IP pour diminuer les temps, les débits

nécessaires et donc les coûts associés. L'étude menée dans [3] donne un aperçu détaillé des Qualité de service (QoS) et les méthodes d'acheminement des informations à la bonne destination à travers un réseau de connexion donné. L'objectif de cette étude présente une résolution du problème de routage multicast avec QoS afin de trouver un arbre multicast à moindre coût et satisfaire les garanties de QoS en termes de délai, de gigue, de bande passante et de taux de perte des paquets.

Dans [4] et dans le but de résoudre la mauvaise réaction du protocole de transport sur les réseaux, les auteurs ont proposé une méthode de différenciation des pertes qui optimise le contrôle de la congestion et augmente donc les performances des protocoles de transport sur les réseaux. L'étude menée par [5] examine les différentes étapes de la mise en place de la vidéodiffusion. Également ces avantages et ces inconvénients, ainsi que les défis rencontrés lors de la mise en place du système y compris la sélection de l'équipement, la formation du personnel, la mise en place de la diffusion en direct et la mise en place de la diffusion en différé. Les auteurs dans [6] proposent deux solutions pour la transmission des flux vidéo sur les réseaux 802.16 et ceci sur la base de l'approche Cross-layer. Il s'est intéressé à la fois à la transmission unicast et multicast sur le lien montant et descendant d'une ou plusieurs cellules WIMAX. Dans [7], la construction de modèles de transmission et de chaîne de communication de réseaux de câbles optiques locaux est décrite. Ce travail traite le processus de multiplexage applicable aux signaux vidéo au format analogique qui pourraient évoluer vers de futurs formats numériques, et est basé sur les propriétés du signal vidéo.

Les auteurs dans [8] ont proposé une chaîne de transmission "Émetteur/Récepteur DVB-T2" intégrant la Radio sur Fibre dont ils ont utilisé une Co simulation "Matlab-Optisystem" afin de déterminer la distance maximale de transport du signal Radio Fréquence (TNT) sur la fibre ; leurs architecture de déploiement du réseau TNT-Bénin intégrant la technologie RoF à permet un coût réduit (Baisse estimée à 33 %) et garantissant les mêmes performances que le réseau actuel.

Les travaux qui tentent d'atteindre ces objectifs sont divisés en deux catégories. La première catégorie s'intéresse plutôt au moyen de transmission et tente de l'optimiser afin qu'il soit plus efficace sur les réseaux. La deuxième catégorie s'intéresse directement au traitement du contenu vidéo afin qu'il soit plus adapté aux transmissions sur différents types de réseaux. Ces facteurs constituent le point de départ de ce travail de thèse, dont l'objectif est de réaliser un système de transmission vidéo via la fibre optique en utilisant une des techniques de compression du HEVC combinée avec le multiplexage temporel. Ce système est basé sur des composants optiques bas coût, et commercialement disponibles. La solution choisie pour l'optimisation de la bande passante va introduire des contraintes liées à sa nature cohérente. Cependant, le codage source et le codage canal sont conçus séparément et ensuite mis en cascade pour permettre d'améliorer la performance globale du système.

En se basant sur l'élimination de ces contraintes, le système présente alors l'avantage d'une optimisation de la bande passante soit pour l'utilisation du moyen adéquat de transport sur le réseau qui est la fibre optique soit pour l'intérêt direct au traitement du contenu vidéo.

Avant d'aborder en détail les phénomènes liés à la transmission vidéo via la fibre optique, il est essentiel de comprendre les principes de base et les aspects généraux de cette technologie. Parmi les éléments clés à considérer figurent la qualité du signal, qui garantit une transmission optimale pour les contenus vidéo en haute définition, ainsi que la faible latence, essentielle pour les applications en temps réel. Une évaluation approfondie par une analyse des forces et des faiblesses des réseaux impliqués est également nécessaire, en examinant leur évolutivité, leur sécurité des données et de leur impact environnemental.

Lors de l'évaluation de la faisabilité de l'installation d'un réseau de communication, il est important de comparer les types de réseaux disponibles, telles que la fibre optique, le cuivre ou les technologies sans fil. Cette comparaison doit prendre en compte des critères comme les besoins en infrastructure,

la compatibilité avec les systèmes existants et les coûts sur le long terme. Une telle analyse permet de déterminer la solution la plus adaptée aux besoins actuels et futurs de la transmission vidéo.

1.2.2 Principes de mise en place d'un réseau

Comme les liaisons en cuivre, les liaisons en fibre optique utilisent plusieurs composants qui s'emboîtent pour former un tout, permettant d'établir des communications à haut débit. Fondamentalement, toute chaîne de communication basée sur la fibre optique (ou le câble en cuivre dans les réseaux associés) se compose de trois parties principales, comme le montre le schéma fonctionnel de la figure 1.1. Essentiellement, il se compose d'un émetteur, d'un canal de transmission et d'un récepteur [9].

Bien entendu, le rôle principal d'un réseau de télécommunications (ou informatique) est de transmettre des informations (données, voix, images, vidéos) entre des émetteurs, qui convertissent les signaux électriques en signaux optiques, et des récepteurs, qui jouent le rôle inverse, en convertissant les signaux optiques en signaux électriques, via un support de transmission qui est la fibre optique avec un minimum de distorsion et de perte de puissance du signal porteur de l'information.

Dans le cas des communications optiques, les fibres optiques aux propriétés inhérentes spécifiques constituent l'objet central du système de transmission. Alors que les composants optoélectroniques d'émission/réception de la lumière (lasers et photo-détecteurs à semi-conducteurs) représentent les éléments primordiaux d'extrémités. A noter qu'à ses deux extrémités s'ajoutent d'autres circuits électroniques très rapides pour la modulation, le codage/décodage, l'amplification en ligne, le traitement de l'information, et enfin la gestion du réseau (détection et correction d'erreurs).

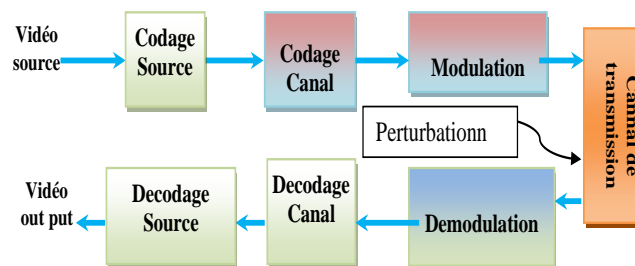


Figure 1.1 : Schéma synoptique d'une chaîne de transmission optique [2]

1.2.3 Aspects des réseaux de télécommunications

Généralement, un réseau de télécommunications (ou informatique) est représenté par des différents éléments qui sont interconnectés pour échanger des informations (voix, données, images, vidéos) [10]. Nous faisons une distinction claire entre les différents types de réseaux optiques publics qui peuvent être divisés en trois principaux types de communication optique (WAN, MAN, LAN), représentés schématiquement sur la figure 1.2 [11], en fonction de leur taille, de leur vitesse de transmission des données et de leur couverture géographique :

- **Le réseau étendu (WAN)** : ou réseau longue distance ("WAN" pour Wide Area Network) utilisé au niveau d'un pays, d'un continent ou à l'échelle mondiale (Internet en est un exemple). Les réseaux WAN terrestres (ou sous-marins) sont conçus pour transporter des données à large bande passante (2,5, 10 ou 40 Gbit/s) à haut débit sur de longues distances, en moyenne supérieures à 1000 km.
- **Le réseau métropolitain (MAN)** : (Metropolitan Area Network) est un réseau desservant une grande ville et ses périphéries, il joue le rôle d'intermédiaire entre le réseau d'accès (réseau de distribution) et le réseau de transport. La longueur de ce type de réseau varie entre 1 et 100 km.

- **Le réseau local (LAN)** : (Local Area Network) appelé, aussi, réseau d'accès ou de desserte. Il est à une échelle géographique relativement restreinte, on le trouve dans les entreprises, les établissements scolaires, les administrations, les salles informatiques, etc.

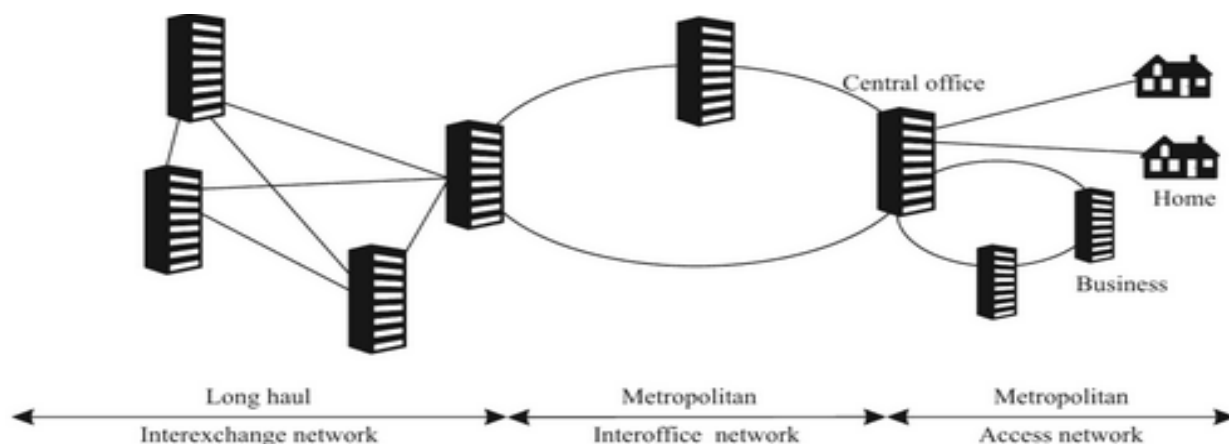


Figure 1.2 : Différentes parties des réseaux publics [11].

Notons bien que ces réseaux sont organisés suivant un des modes de communication (à savoir la transmission vidéo) peut se faire de différentes manières, notamment à travers les techniques de broadcast, unicast et multicast (Tableau 1.1).

Le broadcast consiste à diffuser un flux vidéo à tous les destinataires sans distinction, ce qui peut être utile pour des événements en direct ou des annonces générales. L'unicast, quant à lui, permet d'envoyer un flux vidéo spécifique à un seul destinataire, offrant ainsi une expérience plus personnalisée. Enfin, le multicast permet de diffuser un flux vidéo à plusieurs destinataires simultanément, ce qui est idéal pour les diffusions en direct à grande échelle. Chacune de ces techniques présente ses propres avantages et inconvénients en termes de bande passante et de capacité d'adaptation aux différents types de réseaux.

Tableau 1.1 : Différence entre Unicast, Multicast et Broadcast

Unicast	Multicast	Broadcast
Communication : un-à-un.	Un-à-plusieurs.	Un-à-tous.
Un expéditeur et un destinataire sur le réseau	Un hôte expéditeur et plusieurs hôtes destinataires sur le réseau	Un expéditeur et tous destinataires sur le réseau
Processus très rapide	Rapide	Lourd
La bande passante: très efficacement	Efficacement	Gaspillée

Par conséquent, Tous les différents types de services doivent être pris en charge par un réseau d'accès qui est la première branche d'un réseau de communication en termes de portée entre un fournisseur de service et ses clients qui peuvent être des particuliers abonnés résidentiels, les établissements commerciaux ou les institutions. Afin de mettre en avant la nécessité de connexions rapides et fiables pour répondre à des besoins croissants en services numériques, que ce soit pour un usage personnel ou professionnel.

Les abonnés individuels ont maintenant besoin d'un accès Internet haute vitesse pour accéder à une variété de services multimédias à des prix compétitifs. Les entreprises abonnées, quant à elles, ont besoin d'une infrastructure à large bande et de technologies de données basées sur Ethernet pour fournir un accès à haut débit qui leur permet de se connecter à leur réseau local, au réseau principal

Internet et à d'autres services. Ces connexions sont essentielles pour des usages comme les jeux en ligne interactifs, les visioconférences, la télévision HD, le cloud computing, et bien d'autres, accessibles grâce à des réseaux d'accès multiservices [12].

Cependant, la demande de débit réseau augmente en raison de la croissance continue du trafic mondial et de l'émergence de nouveaux services avec des exigences de plus en plus élevées. Dans ce contexte, la capacité des différents réseaux (Tableau 1.2) devrait être augmentée tout en tenant compte de la consommation de la bande passante, de son coût de construction et de maintenance. La combinaison de réseaux optiques avec un traitement bien orienté pourrait répondre à ces exigences [13].

Tableau 1.2 : Classification des réseaux d'accès [14]

Réseau	Définition	Caractéristiques	Bande passante
DSL	Digital Subscriber Line (ligne d'abonné numérique) - Utilise les lignes téléphoniques existantes pour la transmission de données.	<ul style="list-style-type: none"> • Offre des vitesses variables, • dépend de la distance. • utilise des techniques avancées de compression, de modulation et de codage des données 	<ul style="list-style-type: none"> • peut fournir 1,5 Mbps en aval et 128 Kbps en amont • 1,5 Mbps est suffisante pour recevoir des vidéos compressées • Jusqu'à 100 Mbps
CATV	Cable Television - Utilise le câble coaxial pour la transmission.	<ul style="list-style-type: none"> • Offre des vitesses élevées. • diffusent également les chaînes vidéo au format numérique 	<ul style="list-style-type: none"> • en aval utilise 50 MHz et 550 MHz, 5 MHz et 40 MHz est conservée pour les données en amont. • Jusqu'à 1 Gbps
HFC	Hybrid Fiber-Coax - Utilise un mélange de fibre optique et de câble coaxial.	<ul style="list-style-type: none"> • Offre des vitesses élevées. • Les signaux vidéo pourraient être envoyés sous forme de flux analogiques AM-VSB. • La capacité globale peut être augmentée en utilisant plusieurs fibres et un système de multiplexage 	<ul style="list-style-type: none"> • La vidéo en aval se situe entre 52 MHz et 550 MHz, avec 550 MHz à 1 GHz • présente une bande passante en amont et une fiabilité limitée. • Jusqu'à 10 Gbps
Réseau satellitaire	Utilise des satellites pour la transmission.	Couvre de vastes zones géographiques.	Jusqu'à 100 Mbps
Réseau sans fil	Utilisation des ondes radio pour la transmission.	Offre une connectivité mobile et flexible.	Jusqu'à 10 Gbps
Réseau à fibre optique	Utilise des fibres optiques pour la transmission de données.	Offre des vitesses très élevées et une grande capacité de bande passante.	Jusqu'à 100 Gbps

1.2.4 Description des réseaux d'accès optiques

Dans un monde où la transmission d'informations par signaux électriques est devenue une norme (téléphone, radio, satellite, etc.), les avancées technologiques ont ouvert la voie à des systèmes de télécommunications innovants. Parmi ceux-ci, l'utilisation des ondes lumineuses comme support de communication représente une révolution majeure. Ce progrès repose essentiellement sur deux piliers : la maîtrise des fibres optiques et le développement de sources lumineuses infrarouges à base de semi-conducteurs. Découvrons comment ces technologies ont transformé notre manière de communiquer.

Les réseaux d'accès se divisent généralement en deux catégories principales : câblés et sans fil [12]. En effet, un réseau optique est simplement un réseau de communication dans lequel des informations sont transférées sous forme d'impulsions lumineuses via des lignes à fibres optiques. Grâce à cette technologie, ils permettent la transmission de signaux d'information à bits élevés sur de longues distances.

1.3 Transmissions optiques dans les réseaux de courtes distances

Diverses technologies de ligne d'abonné numérique (DSL), connues sous le nom de xDSL, utilisent une large gamme de fréquences, permettant à une seule connexion en cuivre de transmettre à la fois

la voix et les données. Les appels vocaux sont généralement transmis dans le spectre 0 – 40 kHz et les données sont transmises à des fréquences plus élevées. Ce qui est unique, c'est que les données sont envoyées via une connexion LAN/WAN. Bien entendu, ce partage du cuivre peut poser quelques problèmes. Le support de transmission doit donc être pratique, adapté à la transmission, accessible à plusieurs utilisateurs et qualifié [15].

Les réseaux optiques à courte portée désignent des systèmes de communication dans lesquels la distance de transmission entre deux équipements terminaux peut atteindre des dizaines de kilomètres. Ils sont souvent désignés sous le terme FTTx (Fiber to the x), reposent sur une infrastructure fibre optique pour relier les utilisateurs finaux. Promettant de rapprocher cette dernière du domicile pour fournir une variété de services aux abonnés (tels que la vidéo à la demande, les jeux interactifs en ligne, la télévision numérique haute définition, le Cloud Computing, les partages des fichiers multimédias sur les réseaux sociaux, l'internet des objets IoT), et offrent le potentiel d'une bande passante d'accès élevée aux utilisateurs finaux [16].

C'est au début des années 2000 que, profitant du développement de composants optoélectroniques bas coût et du fait que l'ADSL atteignait ses limites, du point de vue [17], dont les sociétés s'ont également consacrée à la concurrence de la vitesse (de 2 Mbps, 8 Mbps, 12 Mbps à 24 Mbps) et à la concurrence de la densité des équipements des stations ; les déploiements des réseaux d'accès sur fibre optique (FTTx) se sont faits de plus en plus massivement [18][19].

1.3.1 Technologie FTTx

FTTx (Fiber-to-the-x, rapprocher la fibre aussi près que possible de l'utilisateur) est un terme général qui décrit de nombreuses options pour les architectures de réseau à haut débit qui utilisent une connectivité fibre partielle ou complète jusqu'au « dernier mètre ». Cette technologie va de l'équipement de la central à l'équipement terminal de l'utilisateur, y compris OLT (Terminal de ligne optique), ONU (Unité de réseau optique), ONT (Terminal de réseau optique).

a. Terminal de ligne optique (OLT) : Il s'agit d'un équipement de terminaison optique installé dans le central. C'est un élément actif qui remplit les fonctions suivantes :

- La conversion E/O du signal utilisé par l'équipement du fournisseur de service ;
- La conversion O/E du signal fournit par le réseau PON ;
- La coordination de multiplexage entre différentes unités ONTs ;
- Le contrôle de la bande passante.

b. Terminal/Unité de Réseau Optique (ONT/ONU) : Au niveau d'abonné, c'est l'équipement actif installé qui permet de transformer le signal optique venant de l'OLT en un signal électrique. Alors, il assure la connexion du réseau, sur les interfaces spécifiques de ce dernier (RJ45 cuivre pour le PC sur Internet, connecteur coaxial pour la télévision, RJ11 cuivre pour le téléphone analogique, ...). Cet équipement est appelé communément ONU ou ONT pour «Optical Network Unit», « Optical Network Terminal» ou «Terminaison de Réseau Optique ». Ils ont pour rôle :

- Partager le signal optique pour la voie dite descendante (de l'OLT vers les ONUs) ;
- Recomposer le signal à partir des multiples signaux remontants dans l'autre sens (des ONUs vers l'OLT).

Il existe de nombreux types de FTTx, dont le « x » signifie point de terminaison optique inclut les déploiements de réseaux fibre tels que FTTH (Fibre To The Home), FTTO (Fibre To The Office), FTTB (Fibre To The Building) et FTTC (Fibre To The Crub) comme indiqués sur la figure 1.3. Plusieurs architectures FTTx sont adoptées suivant les applications et les services, Nous aborderons ces différentes technologies et leurs architectures associées, en les résumant et en les comparant dans le Tableau 1.3.

Tableau 1.3 : Comparaison de certaines technologies FTTX

	Capacité ONU	Distance entre OLT et ONU	Distance entre ONU et Utilisateur	Le débit par utilisateur	Interface ONU
FTTC	Une centaine	5-100Km	1-3Km	2 à 25Mbps	POTS, ADSL/ADSL2+
FTTB	Une dizaine	<20Km	<500m	50 à 100Mbps	FastEth, POTS, VDSL2/TDM
FTTO	Une entreprise / Unbureau	<20Km	0-50m	100 Mbps à Go	FastEth/GiEth, TDM, WiFi
FTTN	Un foyer Unique	<20Km	0-20m	>= 100Mbps	FastEth, POTS, Wifi,

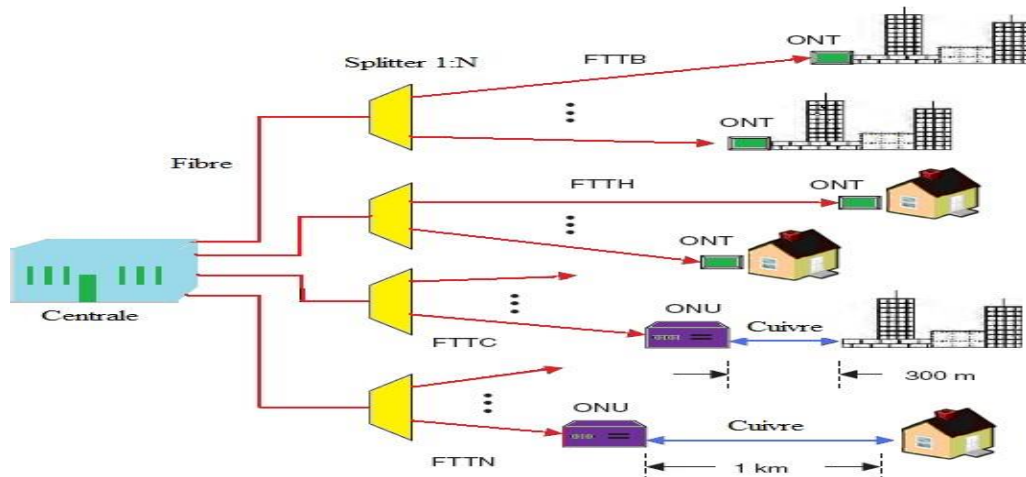


Figure 1.3 : Infrastructure FTTx [20].

1.3.2 Topologie des réseaux

En fonction des composants utilisés, actifs ou passifs[21], les FTTx se classent en deux catégories : les réseaux optiques actifs (AON) et les réseaux optiques passifs (PON). Au fil du temps, on a découvert que PON était nettement meilleur qu'AON, Cela n'était pas seulement dû au fait qu'AON était plus cher (le coût réel des composants actifs était plus élevé et nécessitait plus de maintenance), mais aussi parce que les vitesses PON étaient adéquates pour le service fourni. Les réseaux optiques passifs constituent le meilleur moyen de répondre aux besoins des utilisateurs en fournissant des services rentables et à haut débit. PON possède diverses normes actuelles reconnues par l'union internationale des télécommunications et l'IEEE, telles que ATM-PON, BPON, GPON, XGPON, GEPON et NG-PON. Le premier type d'architecture est basé sur le mode de transfert asynchrone (ATM) et comprend le PON ATM (APON), le PON à large bande (BPON) et le Gigabit PON (GPON) et le deuxième groupe est constitué d'Ethernet PON (EPON).

La figure 1.4, dont l'axe des ordonnées représente les débits de données en flux descendant (en bits par seconde, bps), illustre l'évolution des normes PON au sein de l'ITU-T et de l'IEEE. Aujourd'hui, la plupart des systèmes d'accès optique déployés se sont basés sur les technologies Gigabit PON. Il s'agit de réseaux optiques passifs basés sur une architecture point à multipoint et fonctionnant à des débits de 1,25 ou 2,5Gbit/s dont les opérateurs les privilégient afin de connecter plusieurs abonnés et surtout mutualiser le coût des équipements. En raison des demandes imprévisibles de bande passante induites par la vidéo à la demande, les jeux en ligne et la vidéo haute définition, les chercheurs sont contraints d'augmenter la capacité des réseaux d'accès à fibre optique existants. La large bande passante fournie par les GPON ONU leur permet de transmettre de manière transparente toutes les normes de codage vidéo, notamment MPEG-2 et MPEG-4 [22]. Par exemple, si chaque ONT prend en charge simultanément plus de 256 canaux vidéo MPEG-2 de multidiffusion,

il peut fournir une prise en charge de streaming vidéo pratiquement illimitée via la monodiffusion MPEG-2. Malgré les divers avantages du GPON, il peut fournir des débits binaires inférieurs, des distances moindres et également des utilisateurs moindres. La solution au problème du faible débit et de la faible capacité de données est la norme de réseau optique passif de nouvelle génération qui est séparée en deux étapes diverses telles que NG PON1 et NGPON2.

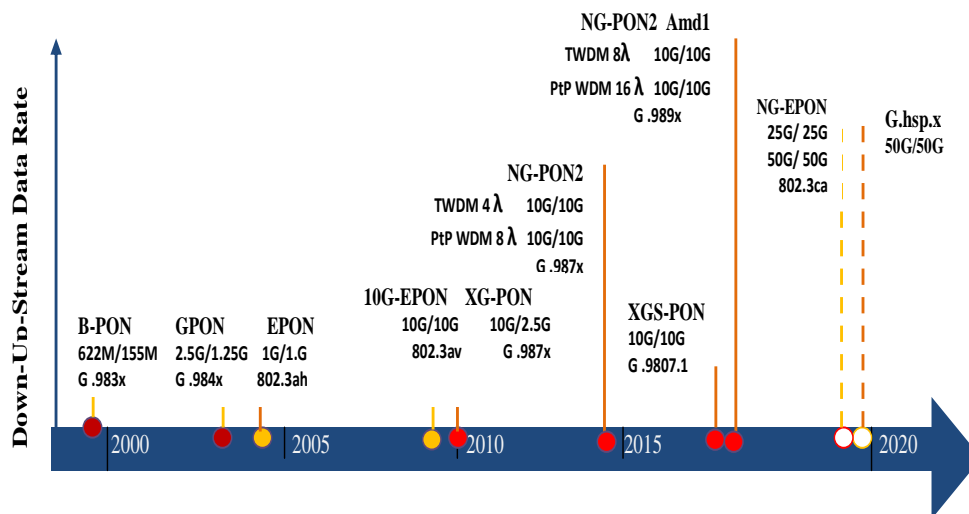


Figure 1.4 : Développement des normes PON dans l'ITU-T et l'IEEE [23].

Le débit de données pris en charge de NG PON1 est symétrique de 10Gbit/s et celle qui offre le plus de capacité actuellement est le NG-PON2 dont le standard est ITU-T G.989. Apparu en 2015, le NG-PON2 permet d'atteindre un débit total de 40Gbit/s avec une simple modulation OOK-NRZ. La technologie qui sous-tend ces performances élevées, est le TWDM-PON qui consiste en l'utilisation du WDM couplé à un accès en multiplexage temporel. La bande de fréquences de la voie descendante est 1596 – 1603nm et celle de la voie ascendante 1524 – 1544 nm donc augmente la bande passante par utilisateur. Améliore la capacité dont le nombre d'abonnés varie entre 64 et 128, chacun pouvant bénéficier d'un débit allant jusqu'à 10Gbit/s. Les abonnés sont reliés au centre de raccordement (ONU) par une fibre G652 (SSMF) ou G657 (SSMF capable de supporter de faibles rayons de courbure) sur une distance de 20 – 40 km [24][25][26].

1.3.3 Transmissions optiques dans les réseaux de moyennes et longues distances

Les réseaux essentiels pour assurer la connectivité entre les différentes régions et les métropoles, ainsi que pour établir des liens entre les différents centres de données et les serveurs sont les réseaux métropolitains et de cœur qui sont généralement utilisés pour transmettre des informations sur de longues distances via des technologies de transmission optique. La bande passante élevée, la faible atténuation du signal et l'immunité aux interférences électromagnétiques sont quelques-uns des nombreux avantages de cette technologie. Les signaux lumineux, généralement modulés en intensité ou en phase, peuvent parcourir des distances considérables avec peu de pertes. Des amplificateurs optiques sont souvent utilisés pour les compenser, permettant ainsi la transmission sur des milliers de kilomètres sans nécessiter de régénération du signal. Ces caractéristiques font de la transmission optique un pilier essentiel des infrastructures de communication à longue distance, notamment dans les domaines des télécommunications interurbaines et des réseaux de fibre optique à haut débit. Cette capacité a été considérablement renforcée grâce à la découverte des performances remarquables des amplificateurs EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier). Cette innovation a joué un rôle clé dans l'intégration et la généralisation des techniques de multiplexage dans les réseaux optiques.

1. 4 Techniques de multiplexage

Le traitement électronique des données, qu'elles soient en émission ou en réception, est limité en termes de débit par la bande passante des composants électroniques par rapport à celle accessible par les systèmes optiques. Théoriquement, la bande passante des fibres optiques peut être utilisée pour construire des systèmes de transmission très rapides. Son importance réside dans le fait qu'elle permet de répondre aux besoins en capacité des nouveaux réseaux à haut débit. Le nombre croissant d'utilisateurs et la quantité d'informations échangées dans les réseaux de communication ont conduit au développement de solutions exploitant les câbles à fibre optique intra-bande pour augmenter les capacités de transmission de ces réseaux optiques. Cependant, actuellement, plusieurs techniques existent pour résoudre ce problème de limitation de débit. Principalement, il existe plusieurs méthodes appelées xDMA (x Division Multiple Access) qui permettent d'améliorer le transfert d'informations sur un seul canal de transmission, tels que la fibre optique, en utilisant une technique de multiplexage [27].

Le multiplexage est un moyen simple qui permet de circuler plusieurs types d'informations entre différents équipements télécoms ou informatiques via un seul canal de transmission, comme mentionné dans la figure 1.5. Ce type de canal de communication peut prendre plusieurs formes, notamment le fil de cuivre pour les transmissions analogiques ou numériques, les ondes hertziennes pour les liaisons satellitaires et la téléphonie mobile, et la fibre pour les transmissions optiques modernes. Le principe est simple, sur le même canal, on multiplexe un nombre N de signaux d'origines diverses (données, voix, images). A un débit de D bits/s, chaque signal est modulé séparément, ce qui permet d'obtenir un signal multiplexé avec un débit de $D.N$ bits/s [28][29]. Cela implique l'envoi simultané des faisceaux lumineux de longueurs d'onde différentes dans une même fibre optique c'est-à-dire permettant à plusieurs signaux de partager un médium de transmission commun. L'installation de plusieurs câbles est l'un des résultats de cette demande. Cependant, ce résultat entraîne des problèmes techniques car la fonction de démultiplexage simultané permet de fractionner des signaux en utilisant des bandes de différentes fréquences.

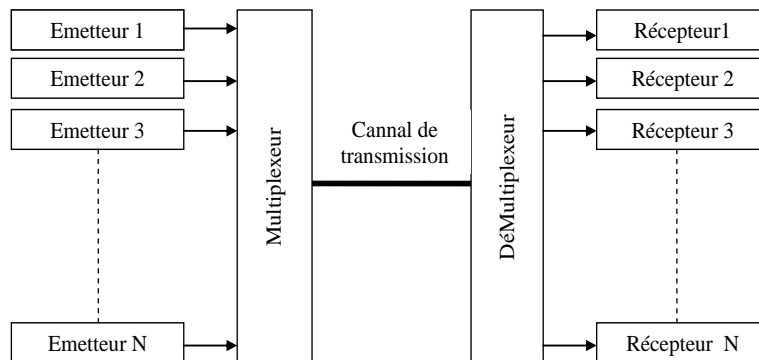


Figure 1.5 : Principe du multiplexage [30]

Pour protéger l'intégrité de l'information, on introduit pour le même type de signal une séparation temporelle TDM (Time Division Multiplexing), spatiale WDM (Wavelength Division Multiplexing), fréquentielle FDM (Frequency Division Multiplexing), ou un codage CDM (Code Division Multiplexing). Ces différentes techniques de multiplexage offrent une variété de solutions pour répondre aux besoins de capacité, de coût et de complexité des réseaux de communication. Chaque technique a un domaine d'application spécifique et est utilisée en fonction des contraintes et des exigences du système en question. Avec l'avènement de technologies de communication de plus en plus avancées, l'importance du multiplexage continuera de croître et sera probablement développées pour faire face aux défis émergents dans le domaine des télécommunications. Dans le contexte de

signaux audiovisuels dans les systèmes fibre optique, deux techniques de multiplexage sont prédominantes : TDM et WDM.

1.4.1 Le multiplexage temporel (TDM, Time Division Multiplexing)

Le multiplexage par répartition dans le temps (TDM) est une technique utilisée pour transmettre plusieurs signaux simultanément sur un seul canal de communication. En TDM, le canal est divisé en plusieurs intervalles de temps, et chaque signal est transmis pendant son intervalle de temps alloué. Ce qui consiste à donner à chaque utilisateur à tour de rôle la totalité de la bande passante pendant un segment de temps prédéfini. En conséquence, plusieurs signaux partagent le canal sans interférer les uns avec les autres [30][31].

Dans un système TDM, l'émetteur est configuré par "N" sources lumineuses modulées en parallèle à un débit de B b/s. Cette technique nécessite que la durée des impulsions optiques émises soit inférieure à NT_b pour éviter les chevauchements [32]. Le multiplexage temporel de signaux audiovisuels dans les systèmes à fibre optique combine plusieurs signaux numériques en un seul flux binaire numérique série, dont le flux d'entrée parallèles est mis dans les emplacements temporels de la sortie série. Dans un système sur fibre optique, le flux de bits série est transmis comme une seule longueur d'onde sur un câble fibre optique. À l'extrémité du canal, un démultiplexage permet la reconstruction du signal parallèle d'origine à partir du flux binaire série, comme représenté dans la figure 1.6.

Il est à noter, aussi, que La technique TDM peut être réalisée de manière entièrement optique, appelée OTDM (Optical TDM), ou de manière électrique, appelée ETDM (Electrical TDM). La principale différence entre ETDM et OTDM réside dans la nature du support de transmission. La première utilise des composants électroniques et des câbles de cuivre ou des ondes radio, tandis que la deuxième, utilise des composants optiques et des fibres optiques. L'OTDM offre généralement une plus grande capacité de transmission et une plus grande bande passante que l'ETDM en raison des caractéristiques supérieures de la fibre optique par rapport aux câbles de cuivre [32][33].

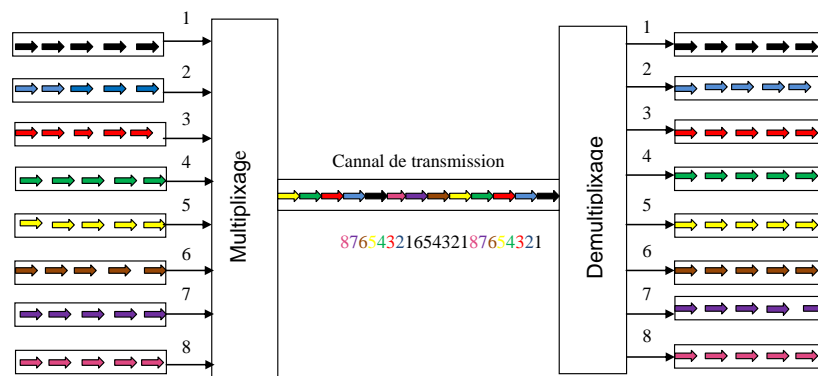


Figure 1.6 : Principe de multiplexage à répartition temporelle TDM [30]

Il convient de noter aussi que l'ETDM est souvent utilisé pour les applications à courte distance, tandis que l'OTDM est plus couramment utilisé dans les systèmes de communication à longue distance, tels que les réseaux de télécommunications à fibres optiques.

1.4.2 Le multiplexage en longueur d'onde (WDM)

Une solution très prometteuse permettant d'atteindre un débit très élevé est l'utilisation de la technologie de multiplexage par répartition en longueur d'onde WDM (Wavelength Division Multiplexing) dans les réseaux d'accès optiques. Le principe de cette technologie se base sur le fait, chaque fibre transporte plusieurs canaux de communication, chaque canal fonctionnant sur une longueur d'onde différente. De tels systèmes de transmission optique ont le potentiel de fournir plus de 50 To/s sur une seule fibre. L'architecture de base et le fonctionnement de WDM est illustrée à la

figure 1.7. Les signaux utiles sont modulés sur différentes fréquences porteuses de façon indépendante et le spectre complet est transmis dans la fibre optique. A la sortie de la fibre, les canaux individuels sont séparés à l'aide d'un démultiplexeur et convertis individuellement. Par conséquent, les signaux de sortie sont traités pour renvoyer des informations aux différents utilisateurs [21].

Contrairement à d'autres techniques de multiplexage qui utilisent une seule longueur d'onde dans les deux sens, le WDM offre la possibilité de transmettre en bidirectionnelle en utilisant plusieurs longueurs d'onde différentes. Compte tenu de la possibilité de transmettre jusqu'à 100 canaux WDM dans une seule fibre, avec la variabilité des largeurs de bande et des formats de modulation possibles, les systèmes WDM se révèlent à la fois économiques et évolutifs [34]. Ils ont été un pilier essentiel de l'expansion rapide de la capacité des systèmes de communication par fibre optique dans le secteur commercial au cours des dernières décennies. Par conséquent, il y a actuellement plusieurs technologies WDM qui sont restées identiques en termes de principe mais se différencient uniquement par le nombre de canaux (longueurs d'onde) utilisables dans une fibre.

D'après plusieurs références [35][36], l'intervalle minimum entre deux longueurs d'onde accessibles est la caractéristique du multiplexage WDM. Ces distances sont mesurées en nanomètres (nm) ou en Gigahertz (GHz). Nous parlons de multiplexage DWDM (Dense WDM) si cet intervalle est inférieur ou égal à 0,8 nm (soit 100 GHz). Des expérimentations ont même été menées à 0,4 (soit 50 GHz) et 0,2 nm (soit 25 GHz), ce qui signifie que 80 et 160 canaux dans une fibre. Mais, pour des espacements encore plus faibles à 0,08 nm, ainsi des systèmes à 10 GHz, nous parlons de multiplexage UDWDM (Ultra Dense WDM) dont 400 canaux optiques peuvent être utilisés, ce qui permet un débit de 4000 Gb/s (4 Tera bits/s) avec un débit nominal de 10 Gb/s par canal. Le Tableau 1.4 résume les caractéristiques des différents modes WDM les plus répandus.

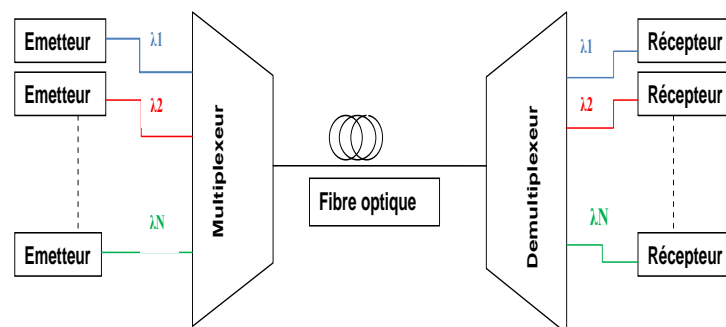


Figure 1.7 : Architecture de base d'un réseau WDM [30]

Tableau 1.4 Caractéristiques des différents modes WDM les plus répandus

Désignation	Nombre de canaux	Espacement des canaux	Fênetre spectrale	Débit/longueur d'onde
Corse-WDM	jusqu'à 16	20 - 25 nm	~ 1260 - 1620 nm	1,25 - 2,5 Gbits/s
Dense-WDM	8 à 128	0,4 - 1,6 nm	~ 1500 - 1600 nm	10 - 40 Gbits/s
Ultra-Dense-WDM	> 400	0,08 nm	~ 1500 - 1600 nm	> 40 Gbits/s

1. 5 Architecture générale d'une liaison optique

L'ingénierie de l'information et les structures de télécommunications à fibre optique ne sont pas nouveaux. Leurs fondations ont été établies avec l'apparition du laser en 1960 et le développement continu de fibres optiques en 1970 avec une atténuation linéaire toujours plus faible [37]. En effet, les performances des systèmes de transmission se sont améliorées depuis les premières fibres optiques avec des pertes atteignant 1000dB/km, grâce au fait que les fibres optiques ont désormais des pertes de fond inférieures à 0,2dB/km pour des longueurs d'ondes près de 1,55µm [38].

Le but des systèmes de transmissions est de véhiculer les informations avec le plus haut niveau de fiabilité de la source au destinataire, à travers un support physique, tel qu'une fibre optique, un câble, etc. Les signaux peuvent être transmis directement à partir de sources numériques (comme les réseaux de données) ou analogiques (comme la parole, les images, etc.) puis convertie sous forme numérique. Le concept d'utilisation de la fibre optique pour transmettre des données peut être trouvé dans tous les niveaux du réseau : WAN, LAN, MAN cependant, leurs conceptions reposent sur le même paradigme qui constitue le fondement des transmissions en bande de base. La figure 1.8 montre le schéma fonctionnel d'un système de transmission numérique.

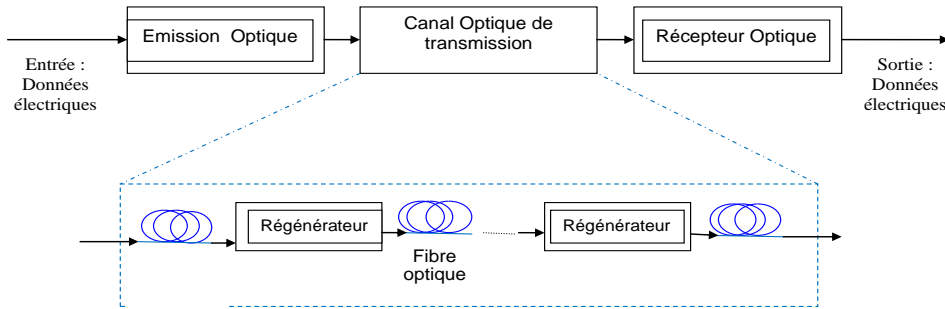


Figure 1.8 : Schéma synoptique d'une transmission optique [39]

Chaque système de communication est principalement constitué d'un bloc émetteur (permettant la conversion électrique/optique), d'un bloc récepteur (permettant la conversion optique/électrique) et une série de segments de fibres optiques séparés par des régénérateurs qui constitue un support de transmission [40]. Dans le domaine des communications optiques, l'objectif principal du système de transmission est de fournir des fibres optiques avec des caractéristiques inhérentes. Les composants optoélectroniques (lasers et photo détecteurs à semi-conducteurs) utilisés pour émettre/recevoir de la lumière représentent les éléments primordiaux d'extrémités. A noter que d'autres composants électroniques et circuits très rapides sont ajoutés aux deux extrémités pour moduler, coder et décoder, amplifier en ligne, traiter l'information et enfin gérer le réseau (détection et correction des erreurs).

Selon le schéma fonctionnel de la liaison optique, représenté dans la figure 1.9, les informations transmises sous la forme de signaux électriques sont codées par un générateur de bits pseudo-aléatoires, ensuite, modulée par une source optique monochromatique cohérente (diode laser), assurant ainsi que le signal peut être porté à $\lambda = 1,55\mu\text{m}$ (fenêtre de transmission des systèmes courants). Le signal optique porteur d'informations généré est inséré dans une fibre monomode puis à l'aide d'amplificateurs à fibre EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier) dopés à l'Erbium placés à distance normales (50 à 120 km) est amplifié pour lutter contre l'atténuation et ainsi permettant une amélioration de la réception [41]. A la sortie, la démodulation du signal électrique se produit (par filtre passe-bas) ou ramené en bande de base, resynchronisé, décodé et corrigé (le taux d'erreur sur les bits adopté par les systèmes actuels est $\text{BER} < 10^{-12}$ selon la norme UIT « Union internationale des télécommunications ») [42] à l'aide des circuits électroniques rapides pour reproduire l'information. La performance de la ligne de transmission peut être déterminée en utilisant différents paramètres, au premier rang figure le taux d'erreur binaire (BER).

Donc, quel que soit la simplicité d'une liaison optique, d'après son étude globale, elle fait introduire des limitations physiques de natures différentes de ces différents composants optoélectroniques et optiques. En vue de garantir une bonne qualité des transmissions (BER inférieur au seuil), il est constamment indispensable d'optimiser et de chercher un compromis entre les différents facteurs affectant la transmission particulièrement la dispersion, le rapport signal à bruit optique (OSNR), les non-linéarités pour le canal de transmission et aussi la maîtrise du codage source.

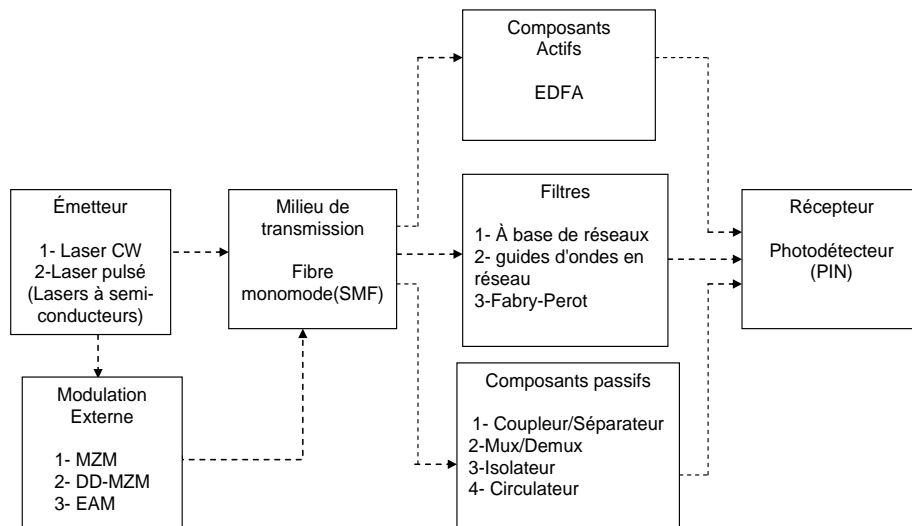


Figure 1.9 : Schéma de fonctionnement d'un système de communication optique [43]

1.5.1 Transmetteurs optiques

Les systèmes de télécommunications actuels emploient les ondes lumineuses telles des ondes porteuses d'informations. L'évolution de cette nouvelle forme de communication est largement due à la maîtrise de la technologie de fabrication des fibres optique et à la disponibilité de sources de lumière infrarouge à base de semi-conducteurs. Effectivement, l'emploi de la lumière dans le domaine des télécommunications sur fibres optiques n'est qu'une simple analogie naturelle de la transmission des signaux électriques à travers des câbles métalliques. Toutefois, deux progrès technologiques permettent d'utiliser la communication optique sur les réseaux publics : la production du laser à semi-conducteur en 1960 et la création de la fibre optique à faible atténuation en 1970 [44]. Ce qui permet à l'émetteur de répondre à deux fonctions primordiales : La création d'un signal optique en utilisant une source lumineuse et sa modulation par un signal électrique qui transporte les informations utilisateur encodées.

1.5.1.1 Sources lumineuses

Les émetteurs de lumière sont des dispositifs actifs conçus pour transformer l'énergie électrique en énergie optique et afin d'introduire le flux lumineux dans le canal optique. Les sources les plus fréquemment employées dans les systèmes de communication optique comprennent la diode laser (LD) et la LED. Le choix entre ces deux alternatives dépend des caractéristiques de conception du circuit, notamment la bande passante et la longueur du circuit. La LED est préférable pour les connexions de courte et moyenne distance, spécifiquement dans les fibres multimodes avec une bande passante limitée, où l'intervalle spectral de la source n'est pas une contrainte majeure. En revanche, la diode laser est principalement préconisée pour les connexions à longue distance [45][46]. Les sources doivent satisfaire à un ensemble de spécifications et de critères afin d'optimiser la puissance lumineuse émise. Ces dispositifs sont essentiels pour :

- La linéarité dans la conversion électro-optique ;
- Relation linéaire entre la puissance émise et le courant injecté ;
- Puissances d'émission optiques supérieures aux milliwatts ;
- Taille et dimensions idéales pour l'intégration de la lumière dans la fibre;
- Faible consommation d'énergie, Durée de conservation, Faible coût ;
- Stabilité avec la température ;
- Capacité de modulation directe, Spectre d'émission étroit, Cohérence spatiale maximale.

A. La diode laser

Une diode laser (Light Amplification Stimulated Emission of Radiation) est un composant semi-conducteur, tel (Fabry-Pérot (FP), Distributed Feedback(DFB) et Distributed Bragg Reflector (DBR)), qui émet ou amplifie des rayonnements cohérents dans laquelle toutes les ondes sont à la même fréquence et la même phase dans la région infrarouge, visible ou ultraviolette du spectre [47]. Il exploite le principe de l'émission stimulée, où des électrons excités dans un état d'énergie plus élevé sont stimulés par un photon incident. Ce qui produit une progression de la puissance de sortie, une réduction des largeurs spectrales et l'obtention d'un faisceau très directif.

Pour comprendre fondamentalement le fonctionnement des diodes laser, il est nécessaire de noter qu'un électron peut passer d'un état à l'autre des trois processus qui se produisent dans l'interaction Rayonnement-Matière : absorption de photons ; émission spontanée ; émission stimulée. Ces processus sont illustrés sur la figure 1.10, où E_1 est l'énergie de la situation fondamentale et E_2 , l'énergie de l'état irrité.

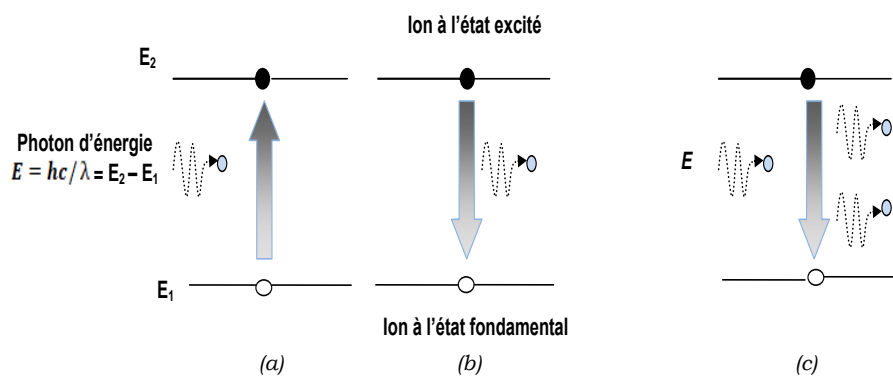


Figure 1.10 : Processus opérationnel du laser [48]

Une source laser est composée de trois éléments essentiels, à savoir le milieu dit à gain, le mécanisme de pompage et le mécanisme de rétroaction optique, comme le montre la figure 1.11. Pour exciter les électrons, le milieu de gain constitué du nombre approprié de molécules, d'atomes ou d'ions est continuellement pompé selon une énergie externe. La pompe externe provoque l'énergie des électrons de l'atome à un niveau supérieur, une condition communément appelée inversion de population. Après émission stimulée, les photons oscillent dans la cavité. Cette dernière fournit une rétroaction à la plupart des photons présents dans la cavité, mais certains s'échappent des parois de la cavité avec une réflectivité réduite de manière appropriée.

Suite au matériau particulier dans le milieu à gain, ces photons échappés donnent naissance à une lumière cohérente avec une longueur d'onde spécifique. Les électrons dans un état excité peuvent également émettre des particules spontanément, c'est-à-dire sans aucune stimulation. Cette émission spontanée de photons est une source de bruit dans les lasers. Pour qu'une source laser émette de la lumière en continu, le taux d'émission stimulée doit toujours être supérieur au taux d'émission spontanée [48]. En fonction de leur utilisation dans les systèmes de télécommunications optiques, on distingue différents modèles : FPL, DFB, DBR, VCSEL, Laser CW, etc.

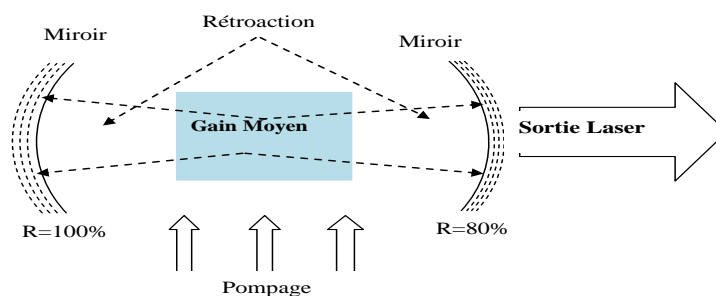


Figure 1.11 : Principe de fonctionnement d'un laser [48]

B. La LED

La diode électroluminescente (Light-Emitting Diode LED) est une source lumineuse constituée d'un matériau semi-conducteur équipé de deux bornes. Il s'agit d'une diode à jonction p-n, généralement fabriquée avec du phosphore d'arséniure de gallium (GaAsP) ou avec de l'arséniure de gallium-aluminium (AlGaAs). Sa structure de base est similaire à celle des lasers à semi-conducteurs mais les principales différences sont le manque d'éléments de rétroaction et le fait que l'émission de stimuli n'est pas effectuée, car elles ne réalisent pas d'inversion de population. Au contraire, la recombinaison radioactive des paires de trous de l'électron dans la couche active génère de la lumière par émission spontanée, produisant de l'énergie en forme de photons, dont certains s'échappent du dispositif par couplage à la fibre optique. Cet effet est appelé électroluminescence. La lumière émise est incohérente avec une largeur spectrale relativement large (30-50nm) et une dispersion angulaire importante.

Les LEDs ont d'innombrables exploitations dans plusieurs domaines tels que l'éclairage, la médecine, l'industrie ou les communications optiques, entre autres. Les trois modèles fréquemment employés pour les systèmes de transmission par fibre optique sont : ELED, SLD et SLED. Il existe des LED de communication à 1310 ou 1550 nm avec une largeur de bande d'émission allant jusqu'à 50 nm et une ondulation très faible. Comme avantage des LED, on peut noter qu'elles sont très robustes, peu sensibles à la température et à faible coût. Toutefois, leur emploi dans les communications optiques est décliné à cause de leur basse puissance et, également, en raison de l'apparition de lasers de très bonnes performances (type VCSEL, figure 1.12) dont l'augmentation de la densité de bande passante est également possible en utilisant une fibre multi-cœur (MCF) couplée à des réseaux VCSEL sur puce. Les débits de données jusqu'à 224Gb/s sont déjà atteints par les VCSEL de 850nm [49].

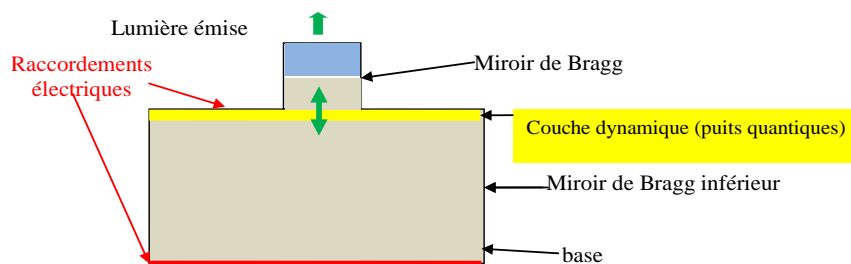


Figure 1.12 : Structure de la diode laser VCSEL [43]

1.5.1.2 Modulation optique

La modulation optique est la procédure dont un Laser peut diffuser de l'information dans une fibre optique en variant quelques propriétés du signal lumineux notamment l'amplitude (ou puissance), la fréquence, la phase, la polarisation ou une combinaison de celles-ci. Il existe deux principaux groupes de technologies de modulation optique selon le laser même ou un élément externe « modulateur » modifiant ainsi le signal :

- La modulation directe (génération de la porteuse avec des lasers directement modulés) ;
- La modulation externe (au moyen de dispositifs externes au laser capables de moduler seuls la lumière rayonnée).

La figure 1.13 présente une classification de différentes façons des modulateurs optiques.

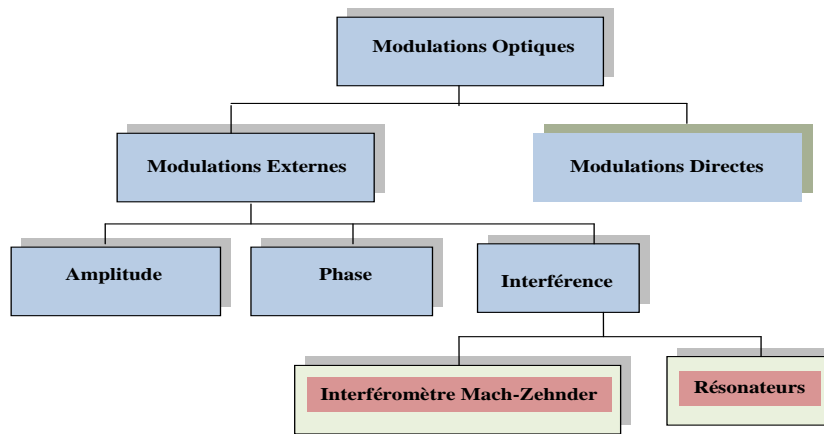


Figure 1.13 : Classification des modulations optiques [50]

A. Modulation directe

L'objectif de la modulation directe est de moduler directement le courant injecté au laser ou on recopie les informations numériques sur le signal optique en injectant des valeurs de courant d'entraînement basses et hautes, ce qui génère deux niveaux de puissance optique de sortie, de façon qu'il allume le laser émettant une lumière cohérente de puissance optique P_1 pour le bit "1" s'il est supérieur au courant de seuil. Tandis qu'il n'émet aucune puissance, $P_0=0$, ou légèrement au-dessus pour le courant qui peut être inférieur au courant de seuil dans le cas du bit "0". Dans ce cas, le rapport des puissances lumineuses lorsque le signal est émis à haut niveau et à bas niveau, est appelé Taux d'extinction (ER) et suit la formule suivante [51] :

$$\frac{P_1}{P_0} = ER < 1 \quad (1.1)$$

Cette modulation présente plusieurs avantages tels que la simple conception, son faible coût ou sa puissance d'émission élevée. Malgré les nombreux inconvénients qu'elle comporte également, c'est lorsque le courant d'injection d'un laser est modulé en amplitude, cela entraîne une modulation de fréquence parasite ou chirp. Ce dernier peut être décrit comme une fluctuation qui provoque un élargissement du spectre en raison des variations de fréquence porteuse avec le temps, c'est le déplacement de la fréquence nominale du laser [52]. L'apparition du chirp limite les distances de transmission et les débits binaires. Une représentation simple d'un circuit de modulation interne est illustrée à la figure 1.14.

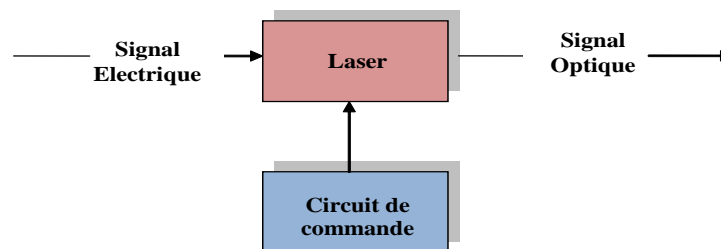


Figure 1.14 : Aperçu de la modulation directe [52]

B. Modulation externe

En utilisant un modulateur extérieur à l'entrée lumineuse, on peut changer l'un des spécifications de l'onde lumineuse, c'est ce qu'on appelle la modulation externe [52] (Figure 1.15). En effet, le module d'émission est constitué d'une diode laser qui exprime un signal continu, d'un modulateur externe qui est géré par un pilote qui modifie le signe de l'information à véhiculer et le niveau de la tension de modulation. La tension du modulateur a la capacité de changer le facteur de transfert en courant de sortie [53]. En raison des limites des impulsions chirp, cette méthode de modulation est bien adaptée aux transmissions à haut débit sur de grands parcours. Concernant la modulation directe,

on peut atteindre une grande amélioration de la linéarité, un indice de modulation plus haut et une bande passante plus grande car elle est déterminée par le modulateur externe et non par le laser, et l'émission du signal optique continu par ce dernier, qui fonctionne sous courant constant, ne présente pratiquement aucune atténuation.

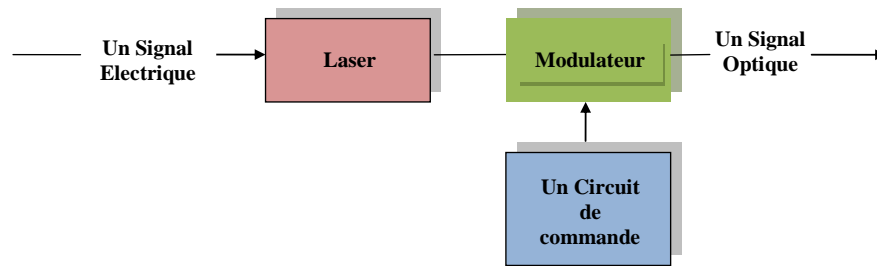


Figure 1.15 : Synoptique de la modulation externe [52]

Dans les systèmes modernes, plusieurs types de modulateurs externes sont utilisés, parmi lesquels les plus répandus sont les modulateurs à électro-absorption « MEA » et les modulateurs Mach-Zehnder « MMZ ».

a. Modulateur à électro-absorption : La structure géométrique des modulateurs d'électro-absorption (Electro-absorption modulator EAM) est identique à celle d'une diode laser. Entre deux zones de protection de type P et de type N, le ruban guidant est enfoui, créant ainsi une jonction polarisée en inverse (Figure 1.16). La matière du guide optique est conçue et choisi de façon à ce que la longueur d'onde de son bord d'absorption soit peu inférieure à celle du signal dont l'intensité doit être modulée.

Les modulateurs d'électro-absorption fonctionnent en modifiant le spectre d'absorption d'un semi-conducteur sous l'influence d'un champ électrique, ce qui entraîne une modification de l'énergie de la bande interdite. Ce phénomène est appelé l'effet Franz-Keldish dans les matériaux massifs et l'effet Stark restreint pour les matériaux quantiques [54]. Les EAMs peuvent fonctionner à des tensions beaucoup plus faibles, leur propriété de taille plus petite en fait un candidat plus souhaitable sur les circuits intégrés et une bande passante plus élevée allant jusqu'à 100GHz [55], mais son inconvénient principal est que le chirp entraîne une interférence inter-symbole (ISI) grave en cas de quantités considérables de dispersion sont injectées dans la ligne.

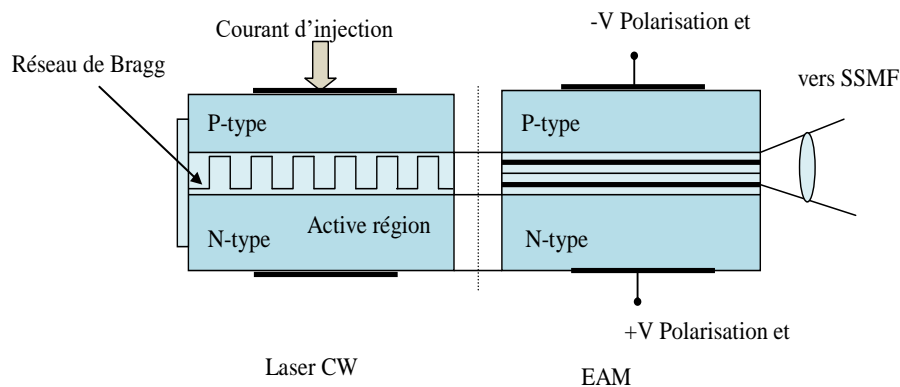


Figure 1.16 : Structure géométrique du modulateur EAM via du LASER [56]

b. Modulateur Mach-Zehnder : Le modulateur Mach-Zehnder (MZM), du nom de Ludwig Mach et Ludwig Zehnder, repose sur une structure interférométrique conçue à partir d'un matériau polyvalent (comme le LiNbO₃, le GaAs, l'InP) [57]. Il fait appel à l'effet électro-optique ou l'effet Pockels pour la modulation de la lumière, une méthode qui n'est présente que dans les cristaux sans inversion symétrique et dont le concept repose sur la variation linéaire de l'indice de réfraction n en fonction d'une tension appliquée U qui réduit un champ électrique E_{in} [58]. Il divise la lumière en deux faisceaux partiels contrarotatifs, puis les recombine avec une différence de

phase contrôlée. C'est à dire l'entrée optique E_{in} est divisée en bras modulateurs supérieur et inférieur qui sont modulés en phase avec deux déphaseurs pilotés par les signaux électriques U_1 et U_2 puis recombinaés dans la sortie optique E_{out} .

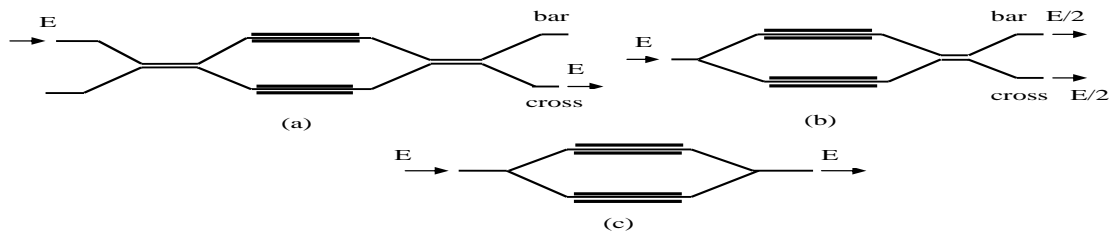


Figure 1.17 : Différentes configurations du MZI [59]

Dans sa forme la plus basique, le modulateur MZ est un dispositif interférométrique qui est généralement constitué d'un bras de référence et d'un bras où une variation de phase est due à l'effet électro optique (EO) (Figure 1.17). Il s'agit de deux bras parallèles et de longueurs égales, qui sont deux guides optiques.

En cas d'absence de tension sur les guides d'ondes, la lumière émise est proportionnellement répartie autour des deux bras de l'interféromètre. L'interférence est créée lorsque les ondes provenant des bras sont recombinaées. Elle est destructive lorsque l'un des bras est soumis à une tension telle que l'écart de phase entre les deux bandes de sortie est un multiple impair de π , ce qui entraîne une transmission nulle de l'interféromètre. Ainsi, l'interféromètre de MZ est un régulateur d'amplitude. Par conséquent, en appliquant une tension $u(t)$ et V_π un indice de conception offrant la tension requise pour entraîner un déphasage de π radians (180°), il est possible de modifier la phase du signal optique $E_{in}(t)$ du départ de manière à ce que le signal optique d'accès $E_{out}(t)$ soit :

$$E_{out}(t) = E_{in}(t)e^{j\frac{u(t)}{V_\pi}} \quad (1.2)$$

Ainsi, un modulateur est marqué par la bande passante, la tension de commande, l'efficacité de déphasage et les pertes optiques d'insertion. La tension de commande est appelée tension demi-onde, également connue sous le nom de V_π , elle est essentiel dans le module de Mach Zehnder. Elle représente la différence de phase de π qui se produit entre les deux bras de l'interféromètre. Elle est influencée par divers paramètres, sa définition peut être donnée comme suit [60] :

$$V_\pi = \frac{\lambda \cdot e}{2 \cdot r \cdot n^3 \cdot \Gamma \cdot L} \quad (1.3)$$

Avec

- r : Coefficient électro-optique.
- λ : Longueur d'onde optique.
- n : Indice de réfraction optique considéré.
- L : Longueur de l'électrode en interaction avec le guide optique.
- Γ : Coefficient de recouvrement des composants optiques et électriques
- e : Distance entre les électrodes.

On peut établir les pertes d'insertion du modulateur Mach Zehnder comme la portée de la lumière transmise par le modulateur lorsque celui-ci est en interférence constructive (c'est-à-dire lorsque toute la lumière le traverse). Ces pertes sont causées par la propagation dont les problèmes de fabrication des guides peuvent les entraîner, elles sont causées par les réflexions à l'interface entre la fibre optique entrant dans le modulateur et la face d'injection de ce dernier, ainsi que des pertes causées par la liaison entre le mode optique de la fibre et le mode du guide d'onde intégré. Ces pertes varient de 0,7dB à 1,2dB [61].

Pour la bande passante, il s'agit de la plage de longueurs d'onde sur laquelle le dispositif peut fonctionner, ce qui permet de limiter le débit dans les communications numériques. Elle est influencée par les dimensions de l'électrode, ainsi que par le gap entre l'électrode et l'épaisseur de celle-ci. Sa largeur est définie comme étant la fréquence à laquelle l'amplitude de modulation diminue à la moitié de sa valeur maximale (-3dB). Cette valeur indique la vitesse maximale à laquelle le modulateur peut être utilisé.

La figure 1.18 illustre le concept fondamental d'un MMZ. Lorsqu'un laser injecte une onde optique continue à l'entrée d'un coupleur 3dB, deux ondes optiques déphasées de 90° et d'une puissance pareille sont générées. Ensuite, on déphase ces deux ondes optiques de ϕ_1 et ϕ_2 à l'aide de modulateurs de phase. On ajoute un déphaseur à 90° sur la voie 1 pour la compensation du retard de phase que le coupleur d'entrée sur la voie 2 peut entraîner. Enfin, les deux faisceaux lumineux sont recombinaés en sortie pour générer une modulation d'amplitude, qui est le résultat du processus d'interférence destructive ou constructive. Comme illustré dans la figure 1.18, les sorties de la partie optique se complètent mutuellement.

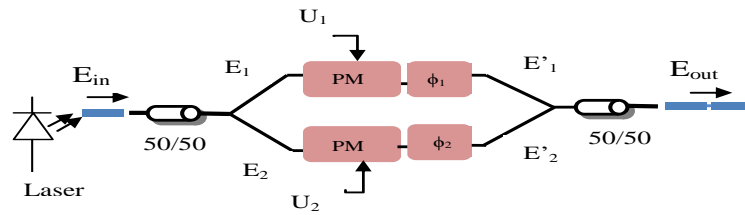


Figure 1.18 : Concept fondamental d'un MMZ [50]

Les signaux appliqués sur les modulateurs de phase ont une influence majeure sur la conversion de sorte que les bras produisent une modulation de phase qui est transformée en une modulation d'intensité.

Les modulateurs Mach-Zehnder peuvent être pilotés dans trois configurations principales : single-drive (SD), dual-drive (DD) et série push-pull. On parle d'une configuration single-drive (SD) où le modulateur reçoit un unique signal électrique (un seul bras est adapté, ou également le signal est fermement distribué entre chaque bras). Si au contraire, des signaux électriques distincts sont appliqués à tout bras, alors c'est une configuration dual-drive (DD). Pour le contrôle push-pull, il est utilisé pour contrôler la phase de manière inverse. La différence de phase est doublée lorsque la phase est modifiée, tandis que la phase moyenne reste constante. Les bénéfices sont que seulement la moitié de la tension requise pour une interférence destructive et qu'il n'y a pas de signal de chirp à la sortie [62].

En se basant sur la figure 1.18, il est possible de voir la relation qui relie le champ électrique sortant d'un MZM E_{out} et du champ entrant dans le modulateur E_{in} ainsi que les liens que les coupleurs 50/50 établissent entre les champs entrants et sortants aux champs intermédiaires $E_{1,2}$ et $E_{1,2}'$.

$$E_{1,2} = \frac{E_{in}}{\sqrt{2}} \quad ; \quad E_{out} = \frac{E'_{2} + E'_{1}}{\sqrt{2}} \quad (1.4)$$

Lorsqu'une onde lumineuse franchisse le bras, elle reçoit un déphasage dynamique $\phi_{1,2}(t)$ induit par le modulateur de phase pour calculer la relation entre $E_{1,2}'$ et $E_{1,2}$ alors, $E_{out}(t)$ d'un MZM peut être exprimé comme [63].

$$E_{out}(t) = \frac{E_{in}(t)}{\sqrt{2}} \left[A'_1 e^{j\frac{u(t)}{\sqrt{v}}\pi} + A'_2 e^{j\frac{u(t)}{\sqrt{v}}\pi} \right] \quad (1.5)$$

Ainsi, la phase du champ $E_{out}(t)$ est la phase moyenne de chaque bras, alors que la variabilité de ces derniers conduit à une modulation d'amplitude. La divergence des phases dynamiques $\Delta\phi(t)$ est causée par la disparité des signaux de modulation.

Si $\phi_1 = -\phi_2$, Le mode de fonctionnement est « push-pull ». La modulation devient ainsi une simple modulation d'amplitude. Ce cas est intéressant pour les communications optiques et limite les problèmes de chirp que l'on peut subir, par exemple avec la modulation directe d'un laser. Le champ $E_{out}(t)$ peut être exprimé comme :

$$E_{out} = E_{in} \cos\left(\frac{u(t)}{V_{\pi}} \pi\right) \quad (1. 6)$$

Une modulation de phase pure est associée Si $\phi_1 = \phi_2$, alors $\Delta\phi(t) = 0$. Ainsi, $E_{out}(t)$ est indiqué par:

$$E_{out} = E_{in} \exp\left(j \frac{u(t)}{V_{\pi}} \pi\right) \quad (1. 7)$$

D'après l'équation (1.5), il est clair qu'en choisissant avec précaution $\phi_1(t)$ et $\phi_2(t)$, un MZM pouvant fournir au champ de sortie n'importe quelle phase et amplitude dans un rayon de $|E_{in}|$. Différents facteurs de distinction sont exploités pour spécifier la modulation d'amplitude. Ces grandeurs et leurs relations sont présentées ci-dessous :

- Le taux d'extinction (extinction ratio ER) défini en dB est généralement représenté par le rapport entre les deux puissances optiques modulées atteintes P_{max} et P_{min} , qui est calculé comme suit [64] :

$$ER[\text{dB}] = 10 \times \log\left(\frac{P_{max}[\text{W}]}{P_{min}[\text{W}]}\right) \quad (1. 8)$$

Pour un MZM idéal, lorsque la différence de phase passe par $\pi [2\pi]$, alors P_{min} est nulle, et théoriquement ER[dB] devient infini. Dans la pratique, les coupleurs ne sont pas entièrement 50/50, aussi la perte optique des deux bras peut être légèrement différente. Ainsi, en pratique, l'amplitude du champ magnétique à la sortie de chaque bras n'est jamais exactement égale à $|E_1| \neq |E_2|$. Ces déséquilibres imposent que la superposition de ces champs de sortie ne soit jamais nulle, même s'ils sont en phase complètement opposée. Par conséquent, le taux d'extinction est une quantité finie et nous essayons généralement de le maximiser.

- l'indice de modulation d'amplitude optique qui détermine l'ampleur des variations d'intensité.

$$m_p = \frac{P_{max}[\text{mW}] - P_{min}[\text{mW}]}{P_{min}[\text{mW}] + P_{max}[\text{mW}]} \quad (1. 9)$$

- L'amplitude de modulation optique (OMA) correspond à la variation de puissance en sortie du modulateur

$$OMA[\text{mW}] = P_{max}[\text{mW}] - P_{min}[\text{mW}] \quad (1. 10)$$

- Lorsque la fréquence du signal modulant est élevée, divers effets électriques et électro-optiques peuvent réduire l'amplitude de modulation. La fonction de transfert dynamique ou électro-optique $|H(\omega)|$ est le rapport de l'amplitude de la modulation optique à la puissance électrique du signal appliqué au modulateur $PRF(\omega)$. Elle est exprimée en grandeur logarithmique et elle est normalisée par la valeur de la basse fréquence en général.

$$|H(\omega)| [\text{dB}] = 10 \log\left(\frac{OMA(\omega)[\text{mW}]}{PRF(\omega)[\text{mW}]}\right) - \lim_{\omega \rightarrow 0} \left\{ 10 \log\left(\frac{OMA(\omega)[\text{mW}]}{PRF(\omega)[\text{mW}]}\right) \right\} \quad (1. 11)$$

- La bande passante électro-optique V_{EO} correspond à la fréquence dont la fonction de transfert électro-optique est de -3 dB :

$$|H(2\pi\nu_{EO})| = -3 \text{ dB} \quad (1. 12)$$

Les modulateurs électro-optiques servent d'éléments essentiels pour la conversion des données numériques (binaire) du domaine électrique à l'optique. Cette technologie a révolutionné la communication à longue distance en dépassant les limites des méthodes traditionnelles de transmission de fréquences radio. À mesure que les demandes de données continuent d'augmenter, les fibres optiques ont progressivement remplacé les câbles métalliques pour des applications à

distance plus courtes. Les centres de données, qui facilitent l'échange d'informations numériques sur Internet, forment de vastes infrastructures réseau. Afin d'adapter les flux de données de volume élevé et les exigences de connectivité entre les centres de données, les systèmes de transmission optique jouent un rôle vital dans l'assurance de cette communication.

1.5.1.3 Formats de modulations

Les systèmes de communication doivent prendre en compte des formats de modulation dans le but d'amélioration de la transmission des informations et d'ajuster le signal en fonction des besoins du canal et des exigences de performance. Les principaux formats de modulations optiques sont présentés ci-dessous :

a. Format OOK

Le Non-Return-to-Zero On-Off Keying (NRZ OOK) est le premier format enregistré pour transmettre des signaux binaires en utilisant des fluctuations d'intensité lumineuse qui se propagent par une porteuse optique avec le temps. Dans ce processus, un modulateur électro-optique contrôle la transmission des pulsations lumineuses sur la base des signaux d'entrée électriques. Un "1" logique correspond à un pulse de puissance optique élevé, tandis qu'un "0" logique résulte d'une transmission de lumière réduite ou bloquée. Le flux de données est évalué en fonction du nombre de bits transmis par seconde. Lors de la réception, le signal optique est transformé en électrique, échantillonné à la même vitesse que la transmission, qui est ensuite évalué par rapport un seuil pour distinguer entre "1" et "0", en retournant finalement l'information binaire originale dans un format électrique.

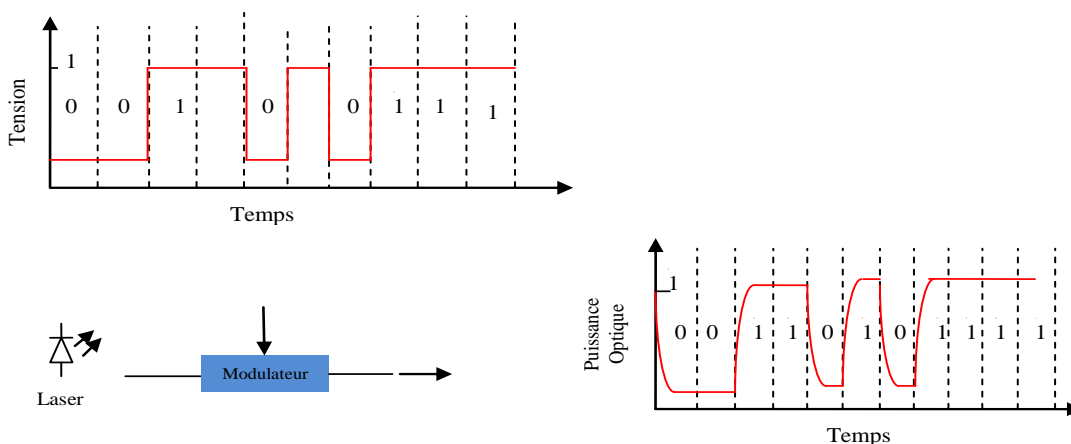


Figure 1.19 : Principe du format OOk (On-Off Keying) [64]

b. Formats de modulation d'ordre supérieur

La modulation On-Off Keying (OOK) peut s'appliquer aux transmissions lorsque le taux de données n'est pas restreint par la bande passante des parties électroniques de la liaison, y compris les amplificateurs, les modulateurs et les photodétecteurs, ni par l'ensemble de raies laser ajustables ou des bandes de fréquence optique disponibles. Cependant, lorsque la capacité de transmission requise dépasse l'une de ces restrictions, il est nécessaire de démontrer une modulation plus sophistiquée. L'efficacité spectrale est la proportion de la puissance d'un signal numérique à sa largeur de bande spectrale occupée, exprimée en bits par seconde par hertz. Les formats avancés de modulation permettent d'améliorer cette dernière en comparaison au format OOK, ce qui permet d'accroître les taux de transfert de données dans une largeur de bande donnée [65].

Les solutions fondamentales sont issues des communications électroniques numériques, directement appliquées à l'optique. La première approche implique l'utilisation de différents niveaux d'intensité régulièrement espacés, dans un cadre de temps prédéterminé. Chaque étape est liée à un ensemble

particulier de plusieurs bits, appelé symbole. Encodant des données, la modulation d'amplitude à plusieurs niveaux, également connue sous le nom de N-ASK (amplitude-shift-keying) ou PAM-N (pulse amplitude modulation), dont N représente des niveaux d'intensité. Prenons une modulation à quatre niveaux (PAM-4), où chaque niveau correspond à une combinaison de deux bits : « 00 », « 10 » et « 11 » [66]. Il est donc possible de transformer une séquence binaire en une série de symboles de deux bits, où chaque symbole est représenté par l'un des quatre niveaux d'intensité, ce qui permet une transmission plus efficace de l'information. Selon les conventions, le bit initial d'un symbole est désigné comme le bit de poids fort (MSB, most significant bit), tandis que le second bit est connu sous le nom de bit de poids faible (LSB, least significant bit).

En termes généraux, afin de coder tous les systèmes possibles à M bits, il est nécessaire d'avoir $N = 2^M$ niveaux distincts. On peut également utiliser la même méthode à la phase du champ électrique. Par exemple, avec deux niveaux de phase, on utilise le binary phase-shift-keying (BPSK), avec quatre, le quadrature-PSK (QPSK) et pour $N > 4$ niveaux de phase, on adopte le schéma générale N-PSK. Une représentation sur le plan complexe des configurations associées aux divers types du système de modulation QPSK est fournie dans la figure 1.20. Il est également envisageable de réaliser un codage hybride entre la phase du champ électrique et l'intensité lumineuse, ce qui entraîne le format N-QAM (quadrature amplitude modulation).

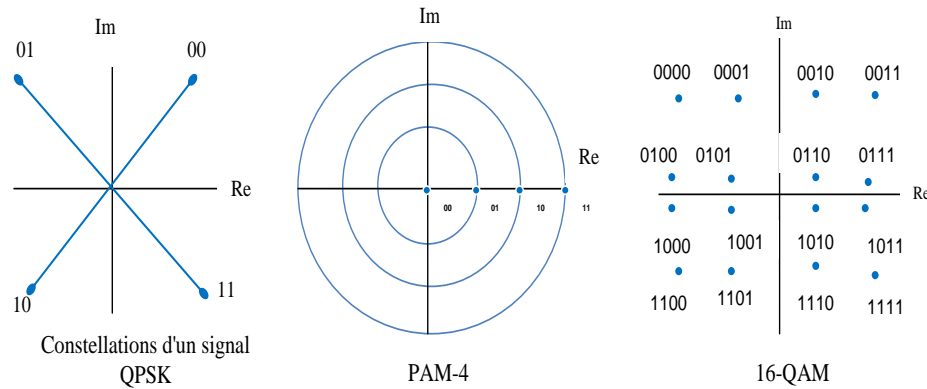


Figure 1.20 : Représentation des symboles des différents niveaux du format de modulation [67]

1.5.2 Canal de transmission optique

Jusqu'à l'avènement de l'électricité, les câbles en cuivre ont été créés. Même si les déploiements Internet à grande échelle sont couramment utilisés, ils requièrent des performances plus élevées pour faire face à l'explosion numérique. Les chercheurs ont donc cherché à trouver une solution garantissant de bons débits de transfert de données. Depuis que le concept de propagation d'une onde lumineuse par réflexion totale interne a été découvert en 1842 [68], de nombreuses avancées ont été entreprises dans le domaine d'orientation de la lumière, notamment de part l'invention de la fibre optique. L'objectif de ces avancées était de répondre aux différents besoins évolutifs de la société dans de nombreux secteurs pour lesquels les dispositifs à fibres font leur apparition. Ces dernières sont à la fois légères et capables de transporter la lumière, ce qui les rend extrêmement intéressantes pour répondre aux défis liés au guidage des signaux lumineux.

La première application réussie des fibres optiques remonte aux années 1950 [69] avec l'invention du fibroscope flexible par Van Heel et Hopkins. Ce dispositif autorisait la diffusion d'images à travers des fibres de verre, notamment en endoscopie et en aviation. La demande croissante des services de communication depuis les années 90 a accru la recherche d'une infrastructure capable de répondre aux besoins des utilisateurs et, en même temps, de garantir un avenir à long terme. Après cela, la fibre optique est apparue, ce qui a entraîné une concurrence avec les réseaux de cuivre depuis le début du siècle. Elle a également été présentée comme une solution définitive à toute future

demande de bande passante de chaque abonné, offrant ainsi un volume de transfert de données optimal à la fois pour les utilisateurs réguliers et les moins conformistes.

1.5.2.1 Généralités sur la fibre optique

Une fibre optique est un fil de verre ou de plastique extrêmement fin capable de transporter la lumière et de transmettre des données. Le débit d'information qu'elle propose est beaucoup plus élevé que celui des câbles coaxiaux et peut être utilisé étant un élément de transport pour un réseau "large bande" qui peut transmettre à la fois la télévision, la visioconférence, le téléphone ou les données informatiques.

Elle est composée d'un brin cylindrique de silice (un matériau similaire au verre à faible coût et à indice de réfraction variable) [70], d'un élément central nommée cœur de diamètre ayant quelques micromètres, avec un indice de réfraction n_1 , entouré d'une gaine à un diamètre de $125\mu\text{m}$, avec un indice de réfraction n_2 , plus faible. Ainsi, la réflexion interne totale se génère à l'interface cœur-gaine et que le faisceau lumineux est dirigé à l'intérieur de la fibre. Et du revêtement qui est conçu en plastique puis en nylon, il sert à la protéger contre les éléments externes tels que l'humidité, les attaques chimiques, etc. (Figure 1.21).

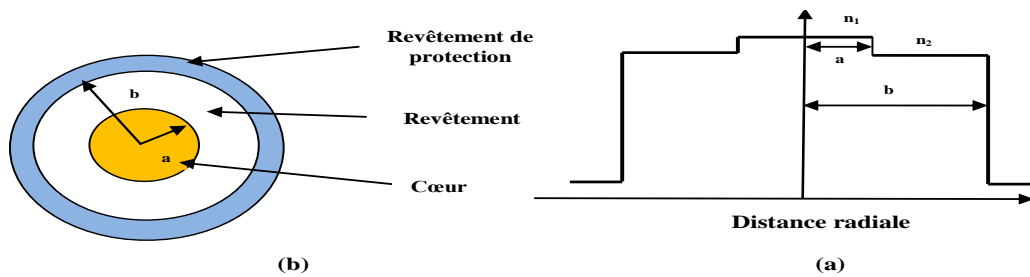


Figure 1.21 : (a) Tracé d'indice de réfraction, (b) Section des couches physiques d'une fibre à saut d'indice [40]

Le nombre permis de modes de propagation dans la fibre sera défini par les indices de réfraction du cœur et de la gaine, ainsi que par le rayon du cœur. Ces modes sont des solutions aux équations de Maxwell déterminant la transmission des ondes au sein du milieu de revêtement du noyau. Alors, il existe deux types de fibres [71] : multimode et monomode. La première fibre à être employée était la fibre multimode. D'une utilisation simple mais limitée en raison de la bande passante. Elle est intéressante pour les distances courtes, de moins de 5 km. Elle possède un noyau de grand diamètre et laisse passer de nombreuses ondes lumineuses simultanément. En revanche, la fibre monomode a une bande passante illimitée mais n'autorise qu'un seul mode de transmission. Il est utilisé sur de longues distances. Les deux sont incompatibles entre elles. Le tableau 1.5 et la figure 1.22 permettent la classification des fibres optiques selon certaines caractéristiques.

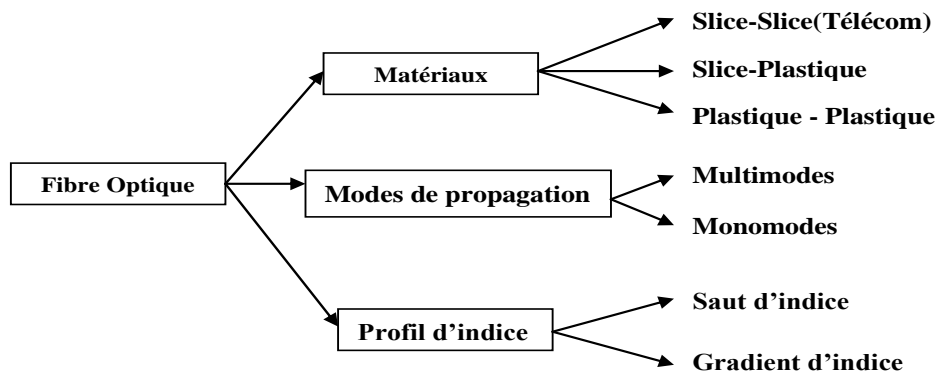


Figure 1.22 : Classification des fibres optiques [68]

Tableau 1.5 : Comparaison des propriétés entre les deux familles de fibre

Caractéristiques	Monomode	Multimode
Ouverture numérique	Faible (connexion difficile)	forte (connexion facile)
diamètre du cœur	entre 6 μm et 8 μm	de 100 μm à 200 μm
diamètre de leurs gaines	125 μm	varie de 150 μm à 250 μm
Atténuation	Très faible (quelque dixième de dB /km)	Faible
Dispersion	Faible	Forte
Bande Passante	>10GHz/km	Comprise entre 200 et 4700MHz.km
Distance	Longue	Réseaux privés
Injection	LASER (VCSEL)	LED

1.5.2.2 Les contraintes via les effets linéaires et non linéaires

Les fibres optiques destinées aux communications longues portées ont été conçues comme monomodes, c'est-à-dire qu'elles ne peuvent orienter qu'un seul type de lumière. Ainsi, en forçant la lumière à suivre une seule voie de diffusion, quelques effets physiques nocifs provoqués par le cadre de propagation seront diminués [72]. A savoir qu'il y a d'autres facteurs qui restreignent la distance et le taux de propagation. On peut distinguer deux types d'effets négatifs : linéaires et non linéaires (Figure 1.23). Dans cette étude on ne prend en compte que la fibre monomode dont les valeurs typiques sont :

$$\Delta = (n_1 - n_2) / n_1 \sim 3 \times 10^{-3} \text{ et le rayon dans la plage de } 2 - 4 \mu\text{m} .$$

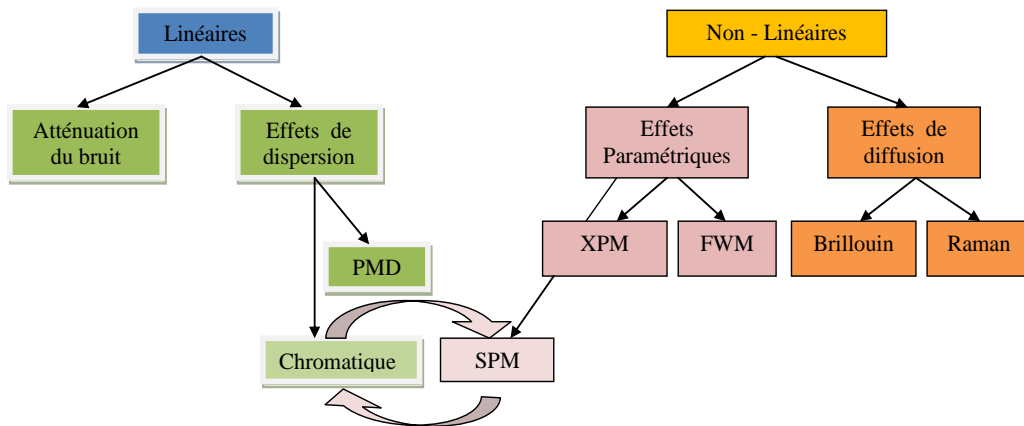


Figure 1.23 : Synthèse des effets linéaires et non linéaires [73]

1.5.2.2.1 Effets linéaires

Ils comprennent l'ensemble des effets qui ne nécessitent aucun échange entre les faisceaux (ou signaux) diffusés. De ce fait, le principe de superposition (l'intensité totale correspond à l'ensemble de l'intensité de chaque faisceau) peut être mis en œuvre. En raison de leur lien direct avec la distance de propagation, les effets linéaires prennent une importance croissante à mesure que cette dernière augmente et permettent une modification et une modification de la puissance des impulsions (atténuation) et leur distribution (dispersion).

A. Atténuation

L'une des principales lacunes correspondant à une diminution de la transmission qui restreint la distance maximale est la perte optique. Elle représente une réduction de la puissance du signal transmis P_s exprimé souvent en décibels (dB). Cette diminution dépend du coefficient de

perte de la fibre α , et de la longueur du canal de transmission L (en mètres). Elle est donnée par la relation suivante :

$$P_S = P_E \exp(-\alpha L) \quad (1.13)$$

Les pertes linéiques, pour leur part, désignent les pertes d'insertion par unité de longueur souvent exprimées en dB/m :

$$\alpha = -\frac{10}{L} \log_{10}\left(\frac{P_S}{P_E}\right) \quad (1.14)$$

L'atténuation dépend de la longueur d'onde de la lumière [74]. Les fibres optiques sont principalement utilisées pour la transmission à deux longueurs d'onde : 1300nm et 1500nm, alors que pour la fenêtre 800 nm, elle est absolument ignorée.

La fenêtre à 1300nm offre une largeur de bande de 50nm et une atténuation moyenne d'environ 0,4dB/km, dont les composants optoélectroniques employés à cette longueur d'onde telle que les lasers et les récepteurs, sont relativement économiques. Cette dernière est donc adaptée aux réseaux de télécommunications à petite distance (quelques dizaines de kilomètres) ou à capacité réduite (réseaux urbains).

La fenêtre à 1550nm offre une largeur de bande de 100nm avec une atténuation moyenne d'environ 0,2dB/km [73]. Elle est divisée en trois bandes distinctes : S, C et L comme illustré dans la figure 1.24. En règle générale, elle est employée dans le domaine des télécommunications de longue distance et grande capacité, car son atténuation faible permet d'éviter de faire appel à des régénérateurs et/ou amplificateurs coûteux.

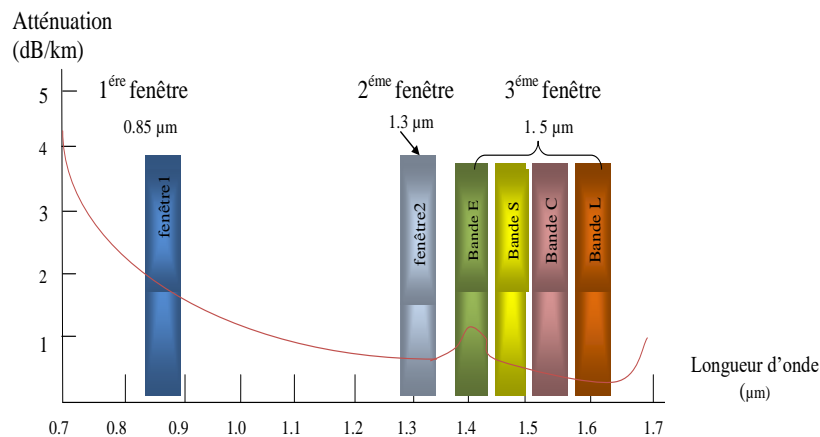


Figure 1.24 : Fenêtres de transmission des fibres optiques [74]

B. La Dispersion

La dispersion désigne l'ensemble des phénomènes qui entraînent des variations dans les délais de diffusion des divers modes, ce qui conduit à la diminution de l'amplitude de la modulation haute fréquence ainsi qu'une extension temporelle d'activité figure 1.25. Par conséquent, la fibre optique recevra en sortie une impulsion avec une largeur de $T + \Delta T$, initialement transmise avec une durée T . Ce phénomène cause un étalement temporel des signaux brefs transmis, ce qui peut les dégrader significativement, restreindre le débit et la portée du système de transmission des données par fibre optique [75]. Cet élargissement et chevauchement de ces impulsions peuvent créer des interférences entre les symboles qui entravent la capacité du récepteur à décoder correctement les informations transmises. En résumé, plus la dispersion n'augmente, plus la capacité potentielle et la portée de transmission diminuent, réduisant ainsi l'efficacité des liaisons optiques.

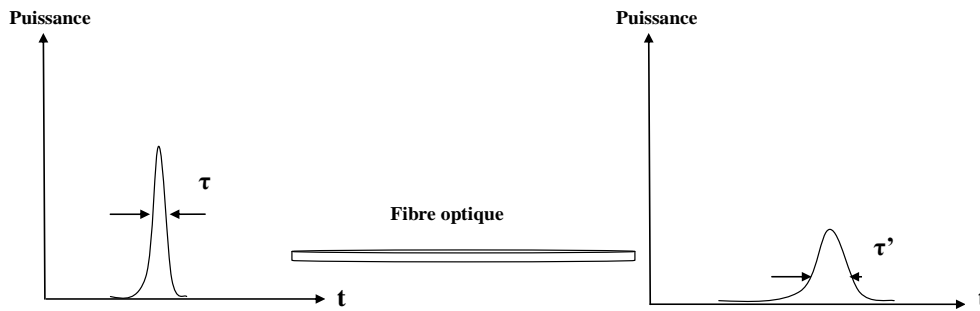


Figure 1.25 : L'évolution de l'impulsion optique lors de la transmission [70]

Les signaux transmis à l'entrée de la fibre sont généralement encodés de manière numérique, composés de séries d'impulsions. Tous ces éléments se rétrécissent évidemment à mesure que le flux d'informations augmente. La vitesse de propagation v_g (ou vitesse de groupe) est dispersée, ce qui entraîne une expansion des impulsions pendant leur transmission, ce qui restreint le débit d'information (bande passante) [72].

Les principaux facteurs de la dispersion comprennent les propriétés physiques de la fibre (diamètre du cœur et l'indice de réfraction), fréquence de la lumière propagée et la température d'utilisation. Divers catégories de dispersion sont principalement présentes dans les fibres optiques : la dispersion intra modale, inter modale et la dispersion du mode de polarisation figure 1.26.

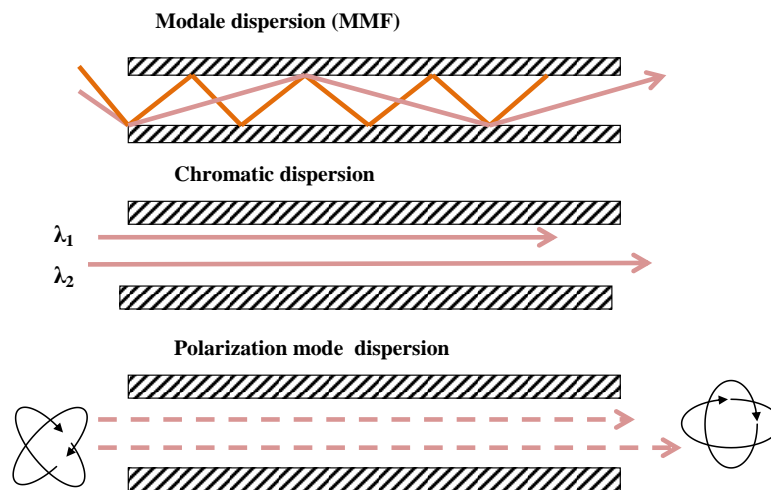


Figure 1.26 : Dispersion dans la fibre [75]

a. La dispersion intermodale

Dans les fibres optiques, les modes désignent les divers chemins que la lumière peut suivre lorsqu'elle traverse leur cœur. Selon le nombre de modes de propagation qu'elle supporte, la fibre peut être classée en deux catégories : les monomodes (ne transmettant qu'un seul mode) et multimodes (propagation simultanée de divers modes lumineux distincts).

Le mode axial est un mode de déplacement rectiligne de certains de ces rayons lumineux à travers le centre de la fibre. Lorsqu'ils traversent le guide d'ondes, les rayons lumineux restants rebondissent à plusieurs reprises sur la limite de la gaine du noyau. Au sein de la fibre, chaque mode se propage selon un angle et des chemins distincts. Étant donné que ces modes se déplacent à des vitesses différentes, il arrive à la sortie de la fibre à des moments différents. Les temps de propagation différents pour chacun de ces modes entraînent un étalement des signaux entre les modes. On désigne cela sous le nom de dispersion intermodale. Les signaux se chevauchent lors de l'étalement, ce qui rend difficile leur différenciation.

Lorsque la distance du trajet s'intensifie, également une augmentation de la dispersion des modes parvient. L'élargissement de l'impulsion à la sortie est influencé par les temps de modes les plus lents et plus rapides de transmission. Dans les fibres multimodes, La dispersion intermodale limite la bande passante et la distance sur lesquelles les données peuvent être transmises. Cependant, il est possible d'éliminer cette dispersion complètement en optant pour la fibre optique monomode [39]. Elle est définie par l'élargissement temporel maximum τ d'une impulsion par unité de longueur de fibre.

$$D_i = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{L} = \frac{\tau}{L} \quad (1. 15)$$

Où t_{\max} et t_{\min} : représentent le temps de trajet du mode le plus lent et celui du plus rapide.

D_i : La dispersion intermodale

b. Dispersion intramodale

L'élargissement des impulsions dans un seul mode est appelé dispersion intramodale ou dispersion chromatique (Chromatic Dispersion CD). Cet élargissement prend une importance considérable à certaines distances. Il est déterminé à l'aide de la formule suivante :

$$\tau = DC(\text{ps. nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}) * L(\text{km}) * \Delta\lambda(\text{nm}) \quad (1. 16)$$

Où : DC : Le coefficient de dispersion chromatique($\text{ps. nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$);
 L : La longueur de la fibre (km) ;
 $\Delta\lambda$: La largeur spectrale de la source (nm) .

La dispersion chromatique correspond à la dérivée du temps de propagation du groupe en fonction de la longueur d'onde, mesuré sur une fibre de 1km. Elle résulte de la superposition de deux phénomènes différents : la dispersion liée au matériau et celle du guide d'ondes. Le premier effet résulte de l'évolution de l'indice de réfraction du matériau constituant le cœur en fonction de la longueur d'onde. Etant donné que l'indice du matériau paramètre la cadence à laquelle la lumière se diffuse à travers la fibre, divers longueurs d'onde se déplacent à différentes vitesses, provoquant l'étalement et la distorsion du signal. Le signe de dispersion du matériau peut être positif ou négatif selon les propriétés de ce dernier et la longueur d'onde transmise. Il indique la direction dans laquelle l'indice de réfraction change par rapport à la variation de la longueur d'onde. Le second, est causé par la structure du câble à fibre optique lui-même. Ce genre de dispersion a lieu car les ondes lumineuses qui traversent la fibre sont confinées au sein de cette structure étroite, cela offre la possibilité de faire voyager les divers longueurs d'onde à des vitesses différentes en raison des variations géométriques. Il peut y avoir une étendue et une distorsion du signal, et cela est généralement plus prononcé à des longueurs d'onde inférieures. Il est possible d'optimiser l'uniformité de la géométrie du guide en utilisant des fibres avec un diamètre de noyau plus élevé ou des structures de guide spécialisées pour diminuer la dispersion de ce dernier.

Alors, la dispersion chromatique apparaît comme la somme de la dispersion du matériau, D_{mat} et de la dispersion du guide D_{guide} . Elle s'exprime alors selon :

$$D_{\text{chrom}} = D_{\text{mat}} + D_{\text{guide}} \quad (1. 17)$$

c. Dispersion du mode de polarisation (PMD)

Ce phénomène est une autre raison de l'élargissement temporel d'une impulsion durant son émission dans la fibre, il est défini par l'altération de l'état de polarisation du mode électromagnétique dégénéré caractérisés par deux directions de polarisation perpendiculaires. Cela provoque une photoélasticité, ce qui génère une biréfringence [76] et une polarisation fluctuante. Ainsi, les deux modes sont excités conjointement, chacun ayant une vitesse de propagations distinctes. Cette différence de vitesse provoque le déphasage entre les deux composantes du mode

fondamental ainsi que le décalage de temps de propagation appelé le DGD (Differential Group Delay). C'est donc le phénomène de dispersion qui apparait.

Etant donné, les impulsions optiques composées d'un taux restreint de fréquences, se répandent à une vitesse de groupe variée, v_g . Ce phénomène entraîne une dispersion de vitesse de groupe (group velocity dispersion GVD):

$$v_g = \frac{c}{n_g(\omega)} \quad (1. 18)$$

Où n_g représente l'indice de groupe [77]. Par une pulsation de contenu fréquentiel établi par $\Delta\lambda$ (la largeur spectrale) suite à une propagation d'une longueur L , on exprime la dispersion totale par :

$$\Delta T = DL\Delta\lambda \quad (1. 19)$$

D représente le facteur de dispersion donné en unités de ps/(km · nm). Il est calculé selon l'équation :

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \quad (1. 20)$$

β_2 : Le coefficient GVD et donné par :

$$\beta_2 = \frac{d^2\beta}{d\omega^2} = \frac{d^2(\bar{n}\omega/c)}{d\omega^2} \quad (1. 21)$$

Les effets d'ordre plus élevé, tels que β_3 (la pente de dispersion), ont été ignorés dans l'expression (1. 21). Ces derniers peuvent limiter la bande passante présente, ou ils acquièrent une importance dans les systèmes de multiplexage.

La dispersion PMD entre les éléments fondamentales de la polarisation est causée par la biréfringence dans une liaison longue distance, ce qui se manifeste par un élargissement τ qui est proportionnel à la racine de la longueur de la fibre. Son coefficient varie entre 0.05 et quelques ps/ $\sqrt{\text{km}}$.

La dispersion standard D est généralement de 17 (ps.nm⁻¹.km⁻¹) pour une fibre optique monomode. Comme pour l'atténuation, la dispersion accumulée tout au long de la transmission limite à la fois la distance et le débit des données. Bien qu'elle soit l'une des principales contraintes des liaisons longue distance ou de moyenne portée, son caractère linéaire facilite grandement sa compensation.

1.5.2.2.2 Effets non linéaires

Les canaux de transmission sur fibre optique, partent du principe que la propagation est linéaire. Toutefois, dès que les puissances transportées augmentent, des effets non linéaires, généralement considérés tel des perturbations, commencent à dégrader les résultats. Actuellement, suite à l'emploi d'amplificateurs de puissance pour les transmissions à haut débit et à longue distance, les puissances injectées dans la fibre sont extrêmement considérables, et cela entraîne une présence accrue et significative des effets non linéaires [78].

On distingue deux catégories de ces derniers : ceux de type inélastique, qui correspondent à une perte de puissance optique (diffusion Raman et Brillouin stimulée), et ceux de type élastique qui conservent la puissance optique (effet Kerr). Ces phénomènes non linéaires, leur origine réside dans la relation entre l'intensité lumineuse et l'indice de réfraction au sein de la fibre [79]. Cet indice de réfraction peut être exprimé de la manière la plus simple par :

$$\tilde{n}(\omega, |E|^2) = n(\omega) + n_2|E|^2 \quad (1. 22)$$

Où $n(\omega)$ représente la partie linéaire, $|E|^2$ désigne l'intensité optique à l'intérieur de la fibre et n_2 correspond au coefficient d'indice non linéaire. La non-linéarité a un impact plus important avec l'augmentation de la puissance optique. Donc, elle établit une limite supérieure à la capacité de démarrage. En règle générale, les dégradations non linéaires peuvent être identifiées en deux classes

: intra-canaux et inter-canaux. La première, représente l'interaction non linéaire du signal et le bruit, traite les effets qu'un canal exerce sur lui-même, ainsi que l'impact de l'auto-interaction du signal dans un canal. La seconde catégorie, quant à elle, concerne les effets engendrés par les canaux voisins. Elle examine l'interaction non linéaire entre les signaux et les bruits provenant de ces derniers. Dans cette thèse, nous mettrons en lumière les effets spécifiques qui se révèlent lors de la transmission optique dans les systèmes OTDM.

A. L'effet Kerr

Pendant leur propagation, les signaux optiques sont soumis à des effets non linéaires, principalement causés par l'effet Kerr optique. Les propriétés optiques du milieu changent dès que des ondes lumineuses de grande intensité parcourent le cœur de la fibre, ce qui entraîne une variation de l'indice de réfraction en fonction de l'intensité du signal incident. Ce phénomène entraîne une modulation de phase, qui peut se révéler sous différentes formes : automodulation de phase (SPM), mélange à quatre ondes (FWM), modulation de phase croisée (XPM) et de polarisation croisée (XPoIM).

a. Auto-modulation de phase

Quand la phase varie en raison de la modification de l'indice causée par la puissance du signal lui-même, on parle d'automodulation de phase (SPM) [80]. Ce phénomène conduit à une accumulation de phases non linéaires pendant la propagation, ce qui entraîne une expansion du spectre des impulsions, à la différence de l'effet de dispersion.

On peut étudier l'impact du SPM en supposant que les conséquences de la dispersion chromatique sont minimales. Le déphasage non linéaire produit est alors représenté par [81] :

$$\phi_{NL}(z, T) = \left(\frac{L_{eff}}{L_{NL}} \right) |u(0, T)|^2 \quad (1. 23)$$

$$L_{NL} = \frac{1}{\gamma_0 P_0} \quad (1. 24)$$

$$L_{eff} = [1 - \exp(-\alpha L)]/\alpha \quad (1. 25)$$

L'enveloppe de champ à $z = 0$ est représentée par $u(0, T)$, γ_0 représente le coefficient non linéaire de la fibre, P_0 sa puissance de crête, α désigne son atténuation et L sa longueur dont L_{eff} est la longueur effective de la fibre (prend en compte les pertes), L_{NL} est la longueur de non-linéarité. Les impulsions réduites et symétriques appliquées en entrée de la fibre sont élargies par ce déphasage, à cause de la corrélation entre la fréquence d'une onde et sa phase instantanée. Quand elle évolue dans le temps sous l'effet de l'impulsion, cela implique que la fréquence optique instantanée diffère de la fréquence centrale. L'expression [82] permet de décrire ce décalage de fréquence optique:

$$\delta\omega(z, T) = -\frac{\partial}{\partial T} \phi_{NL}(z, T) = -\left(\frac{L_{eff}}{L_{NL}} \right) \frac{\partial}{\partial T} |u(0, T)|^2 \quad (1. 26)$$

On désigne $\delta\omega$ cette dépendance temporelle sous le nom de fréquence de chirping. La figure 1.27 illustre l'effet de l'automodulation de phase sur un signal. On y observe l'oscillation de la porteuse d'une impulsion avant et après l'application de la SPM. Sous l'effet Kerr, des fréquences plus basses surviennent à l'avant de l'impulsion $t < 0$, tandis que des fréquences hautes à l'arrière. Cela génère une dérive en fréquence (chirp) non linéaire positive au centre de l'impulsion accompagné d'un élargissement spectral de celle-ci.

L'automodulation de phase amende le spectre de l'impulsion en engendrant des photons de fréquences plus basses que la fréquence porteuse sur la montée de l'impulsion, et des fréquences légèrement plus élevées sur sa descente.

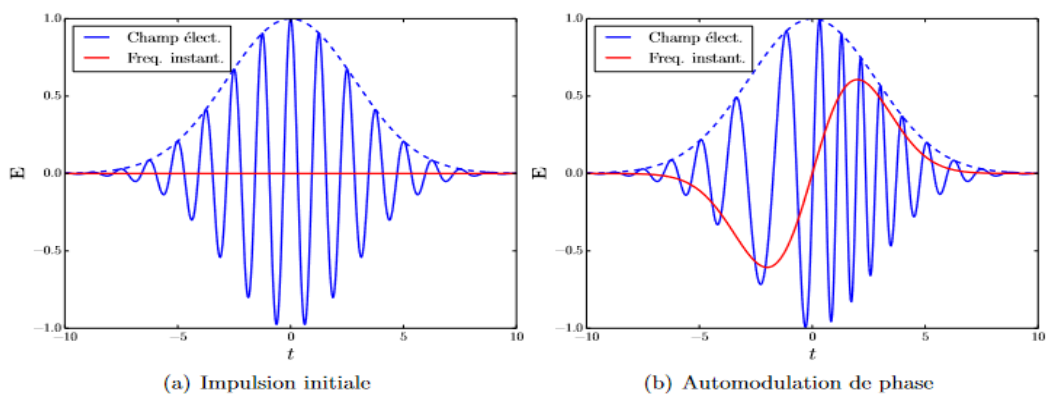


Figure 1.27 : Représentation de l'effet d'auto modulation de phase [83]

La SPM provoque ainsi, une modification de la phase de l'impulsion sans changer son intensité. Cette variation de phase sera convertie en variation d'intensité par la dispersion chromatique de la fibre. On utilise le Chirp généré par la SPM pour réduire les effets de la dispersion qui entraîne une augmentation de l'impulsion [83].

b. Modulation de phase croisée (cross-phase modulation)

Elle est également la résultante du déphasage causé par l'effet Kerr. Cependant, contrairement au SPM, la XPM est le résultat du déphasage provoqué par l'apparition du signal optique provenant d'un canal adjacent, plutôt que par le signal lui-même [84].

L'effet XPM se produit lorsque deux ondes ou plus, de fréquences distinctes se répandent en même temps dans la fibre. Ce phénomène correspond à un déphasage non linéaire d'un champ optique, lorsque les champs à différentes longueurs d'onde se propagent ensemble. Ce processus entraîne une modification de la phase d'une onde par l'autre [85]. Outre cette modification de phase un glissement temporel (walk off) entre les séquences de chaque canal qui se propagent à des vitesses différentes suite à la dispersion chromatique. Elle entraîne une expansion du spectre et une variation du moment d'arrivée des impulsions influencée par des informations du canal déstabilisant. Certaines combinaisons binaires exercent une influence variable, les bits à 1 étant ceux qui déclenchent cette phase non linéaire [86].

La XPM est systématiquement liée à la SPM et résulte de la relation de l'indice de réfraction effectif d'une onde, non seulement à son propre intensité, mais aussi à celle des autres ondes se propageant simultanément [87].

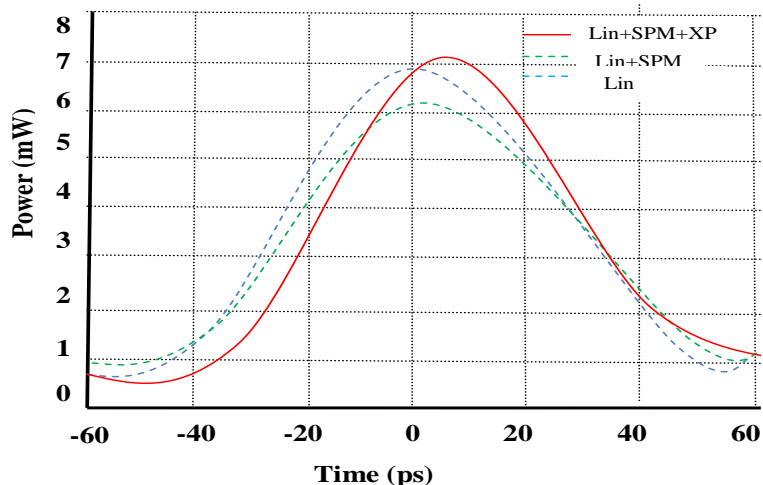


Figure 1.28 : Modulation de phase croisée [59]

c. Mélange à quatre ondes (Four Wave Mixing)

Le FWM représente un processus d'intermodulation en optique non linéaire. C'est un mécanisme paramétrique dans lequel trois ondes électromagnétiques interagissent pour générer ou amplifier une quatrième onde. C'est à dire que Lorsque trois ondes ω_1, ω_2 et ω_3 interfèrent dans un milieu non linéaire, elles donnent naissance à l'onde ω_4 . Une représentation spectrale de ce mélange à quatre ondes est illustrée dans la figure 1.29.

Ce processus a fait l'objet d'une étude profonde dans le cadre des systèmes de transmission WDM. En effet, l'effet FWM est influencé par la dispersion de la fibre ou son augmentation gêne les liaisons entre les signaux et réduit l'échange de puissance vers les nouveaux signaux générés et l'espacement des canaux, notamment leurs augmentation le diminue également [59][88].

La compensation du facteur FWM est devenue plus importante pour les systèmes optiques multivoies à grand débit. Par ailleurs, FWM a la capacité de réaliser des amplifications paramétrées, de conjugaison de phase optique, de conversion de longueur d'onde et de démultiplication de canaux OTDM (Optical Time Domain Multiplexing) [89].

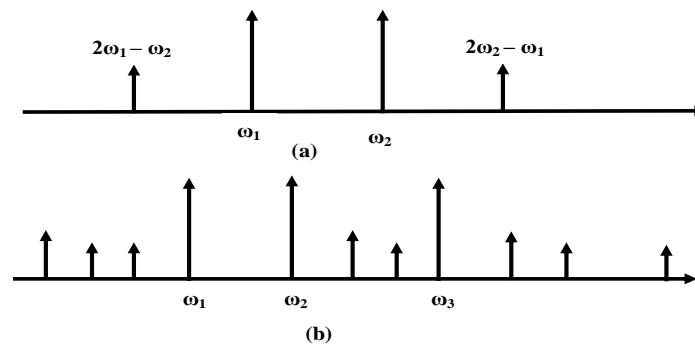


Figure 1.29 : Les composantes de fréquence résultantes dues au FWM

(a) deux signaux d'entrées ω_1 et ω_2 (b) trois signaux d'entrées ω_1, ω_2 et ω_3 [89]

La figure 1.29 illustre comment ces produits croisés perturbent la longueur d'onde d'origine et entraînent le mélange. En réalité, ces signaux parasites sont directement affectés par la longueur d'onde d'origine, ce qui rend leur filtrage difficile. Si un système à 3 canaux est utilisé, il y aura 9 produits croisés, dont 3 seront sur la longueur d'onde initiale. L'écartement des canaux et la dispersion des fibres sont à l'origine de cela. Lorsque les canaux sont trop proches, cela entraîne la formation de FWM.

En diminuant la dispersion, FWM augmente, car la dispersion est inversement liée à l'efficacité du mélange [90]. Trois des produits interférents sont visibles juste au-dessus des trois signaux d'origine, tandis que les six autres produits sont en dehors des trois signaux d'origine. Il est possible de filtrer optiquement ces six longueurs d'onde. Les trois substances perturbatrices qui dépassent les signaux d'origine sont combinées et ne peuvent être en aucun cas éliminées. La figure 1.29 illustre les résultats de manière graphique. Les trois signaux originaux sont les trois barres hautes pleines. Les neuf produits interférents sont représentés par des barres croisées plus courtes.

B. Diffusions Raman et Brillouin stimulées

Les phénomènes évoqués précédemment sont élastiques en raison de l'absence de transfert d'énergie entre le champ électrique et l'espace diélectrique. Les diffusions inélastiques stimulées ont pour particularité de transférer une partie de l'énergie du champ optique vers le milieu considéré. Ces processus sont désignés sous les noms de diffusion stimulée Raman (SRS) et de diffusion Brillouin (SBS) [91].

L'effet Raman est le plus célèbre des phénomènes non-linéaires. Il correspond à un échange photon-phonon, impliquant une interaction d'énergie entre l'onde optique et les vibrations du matériau. L'effet Brillouin, quant à lui, est similaire, mais l'interaction concerne des phonons acoustiques, c'est-à-dire avec les vibrations globales du matériau, se propageant à la vitesse des ondes acoustiques. Ces effets surviennent dès que la puissance injectée dépasse un seuil spécifique. Afin de les réduire, une méthode consiste à moduler à une fréquence très basse le courant d'injection du laser, ce qui provoque une modulation de fréquence du signal optique diffusé et élargit le spectre jusqu'à quelques GHz. Cependant, il est possible d'ignorer ces phénomènes, car ils ne se génèrent qu'à des puissances d'entrée supérieures aux valeurs habituellement employées dans les systèmes de transmission optiques [92].

Les interactions non linéaires entre les signaux et le bruit entraînent des détériorations intracanaux. Pour cette thèse, nous examinerons de manière détaillée les conséquences de la transmission optique dans les systèmes OTDM à modulation DPSK.

1.5.2.3 Les techniques de transmissions

En théorie, grâce à leur considérable bande passante, les fibres optiques permettent la possibilité d'atteindre des débits de diffusion excessivement élevés en théorie. Toutefois, le processus de traitement électronique des données, tant lors de l'émission que de la réception, entraîne des contraintes de vitesse. Ces limitations sont causées par les dispositifs électroniques, dont la bande passante est beaucoup plus faible que celle des systèmes optiques. Il convient de souligner que la corrélation entre le débit (ou taux de transmission des données) et la bande passante est un principe essentiel dans le secteur des télécommunications. Le théorème de Shannon-Hartley décrit particulièrement cette relation :

$$D = B \log_2(1 + \text{SNR}) \quad (1.27)$$

Où : D est le débit maximal (bps), B représente la bande passante (Hz), SNR c'est le rapport signal sur bruit.

L'augmentation croissante du taux de consommateurs et du volume de données échangées au sein des réseaux de communication a nécessité la mise en place de solutions visant à renforcer leurs potentiels tout en exploitant pleinement la large bande passante offerte par la fibre optique. La mise en place de méthodes de codage performantes, comme le codage de correction d'erreurs (FEC - Forward Error Correction), permet de repérer et de corriger les erreurs sans avoir besoin de retransmission. Il est aussi possible d'évoquer l'utilisation de techniques de compression des données à l'aide d'encodeurs spécifiques, les Techniques de Modulation Avancées et des techniques de multiplexage qui ont ainsi été développées et des solutions qui seront détaillées dans le prochain chapitre. Dans la section suivante, nous détaillons les importantes techniques utilisées.

A. Formats de modulations

Les systèmes de communication optique ont pour objectif la diffusion des informations numériques sous forme de « 0 » et « 1 » à travers des signaux lumineux. Il est donc primordial de développer un code permettant de traduire ces données en modulant un signal lumineux continu de façon adéquate.

Plusieurs modifications du signal optique offrent la possibilité de codifier le signal. Elles peuvent être réparties en deux grandes classes: la modulation d'amplitude (ASK - Amplitude Shift Keying), également connue sous le nom de codage en intensité ou OOK (On/Off Keying). Ce type comprend divers formats de modulation, tous basés sur l'utilisation de l'intensité de l'onde lumineuse pour représenter l'information binaire. Parmi les principaux formats de modulation d'amplitude, on trouve les formats RZ (Return-to-Zero) et NRZ (Non-Return-to-Zero). Pour de plus amples informations sur ces phénomènes, le lecteur peut consulter la référence [93].

La seconde classe concerne la modulation de phase (PSK - Phase Shift Keying), qui utilise la modification de la phase du signal porteur pour transmettre les informations. La modulation d'amplitude est souvent privilégiée dans les systèmes de communication optique par rapport à cette méthode, car elle permet d'avoir une résistance accrue aux fluctuations et aux impacts de propagation. Le signal optique est moins sensible aux variations d'intensité causées par les altérations sur le chemin de transmission en modulant l'information binaire dans la phase de l'onde lumineuse plutôt que dans son amplitude.

Aujourd'hui, la modulation de phase, notamment le type DPSK (Differential Phase Shift Keying), connaît un succès croissant en raison de sa capacité à repousser les limites des performances à haut débit [94]

a. Modulation et Démodulation des signaux optiques DPSK

DPSK est une technique de modulation numérique, dans laquelle il n'y a pas de signal de phase de référence. Elle est utilisée pour moduler la phase du signal porteur en fonction des données présentes et précédentes. Cette technique de modulation est utilisée côté émetteur. Lorsqu'un système reçoit un flux binaire de données, il exploite la phase de l'onde lumineuse, pouvant prendre deux valeurs (0 ou π), pour les encoder. Alors c'est une forme non cohérente de modulation par déphasage qui évite d'avoir besoin d'un signal de référence cohérent au niveau du récepteur. La séquence binaire d'entrée est d'abord codée différemment puis modulée. Cela exige un pré codage logique pour fournir le signal modulé et fait appel à la détection différentielle afin de reconstruire les données binaires du signal reçu.

Il est généralement admis que les détecteurs optiques ne captent que l'intensité du signal, sans en conserver la phase. La démodulation cohérente permet d'extraire le profil de phase d'un signal optique en le faisant interférer avec un oscillateur local dont la fréquence et la phase sont stabilisées. Cette technique, utilisée dans les systèmes de communication optique à haut débit, revalorise l'efficacité de détection tout en réduisant les distorsions.

La détection différentielle est une méthode employée afin d'extraire les données de phase des signaux optiques. Dans cette approche, le signal optique émis interfère avec soi, mais avec un décalage temporel égale à un temps-bit. Cela est réalisé à l'aide d'un interféromètre de Mach-Zehnder, dont l'un des bras est étiré par rapport à l'autre d'une longueur équivalente à la distance parcourue par le signal pendant un temps-bit (environ 4 cm pour un débit de 10 Gbit/s, ou 1 cm pour 40 Gbit/s) [95]. Dans un système classique, ce retard est ajusté en modifiant la longueur des bras de l'interféromètre [96].

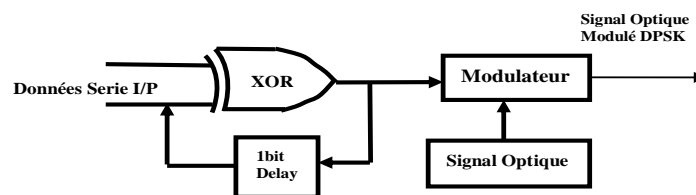


Figure 1.30 : Schéma général Modulation du signal DPSK [97]

La règle de codage du codeur différentiel est l'équation suivante.

$$b_n = a_n \oplus b_{n-1} \quad (1.28)$$

Où : b_n est la sortie actuelle, a_n est l'entrée actuelle, b_{n-1} est la sortie précédente.

b. Codage duobinaire du signal DPSK

Il a été montré que certains avantages peuvent être obtenus en effectuant un codage duobinaire qui peut être produit électriquement en traitant le signal binaire d'origine dans un système de

transmission DPSK. Pour faire un signal binaire à un duobinaire, le signal est d'abord enregistré de manière modulo 2, comptant le nombre de zéros, puis codé en ajoutant le signal enregistré à lui-même mais retardé d'un bit puis en supprimant un. L'objectif de cette méthode est de soustraire le signal binaire de sa version décalée d'un temps-bit, générant ainsi un signal électrique à trois niveaux : +1, 0 et -1, associé respectivement aux combinaisons "1 - 0", "1 - 1" ou "0 - 0", et "0 - 1".

Ces niveaux sont ensuite ajustés pour correspondre aux premiers maximums de la fonction de transfert en intensité du modulateur Mach-Zehnder (MZM), ainsi qu'au minimum et au maximum suivants. Le codage est ce qui se fait dans l'interféromètre de Mach-zehnder. Un système de transmission DPSK normal pourrait donc ressembler à la figure 1.31 [98]

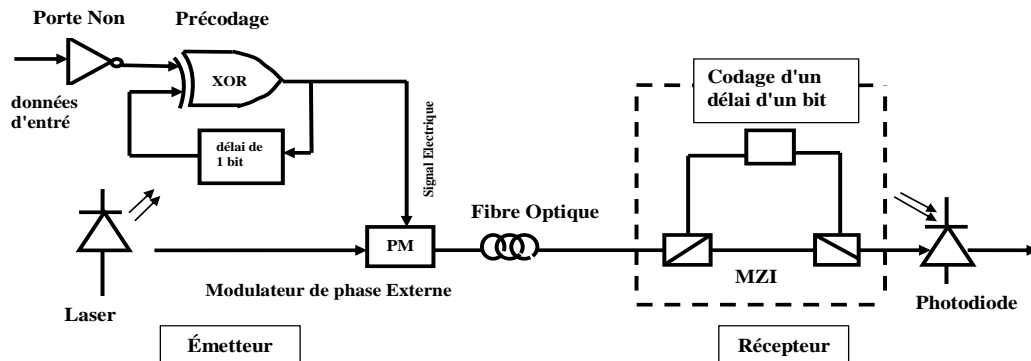


Figure 1.31 : Codage en transmission DPSK [98]

B. La technique OTDM: Optical Time Division Multiplexing

Clarifions d'abord le concept de multiplexage. C'est un processus par lequel plusieurs flux d'informations (appelés canaux) sont assemblés et transmis sur le même support. Dans notre cas, nous utiliserons le multiplexage temporel optique (OTDM).

Dans les systèmes OTDM (Figure 1.32), il est également envisageable de transférer divers signaux optiques simultanément via la même fibre, tout en utilisant la même porteuse optique. On multiplexe optiquement les signaux optiques au même débit binaire afin de créer un train binaire combiné. Si N signaux optiques d'entrée sont présents, le signal combiné a N fois le débit binaire d'un signal d'entrée et est constitué de N canaux. Chaque bit consécutif dans chaque intervalle est attribué à un canal distinct. Au niveau du récepteur, ce signal est ensuite démultiplexé non pas selon les différentes longueurs d'onde, comme le cas en WDM, mais en fonction du temps d'arrivée des bits.

La technique OTDM s'est avérée être une méthode simple pour augmenter le débit binaire dans un canal. Ces systèmes sont intéressés par un phénomène appelé diaphonie (Figure 1.33). Cependant, une diaphonie cohérente entre des impulsions adjacentes de même longueur d'onde se produit facilement si la largeur d'impulsion des impulsions n'est pas suffisamment étroite [99]. Ainsi, quand on multiplexe plusieurs canaux, une partie de l'énergie d'un canal est présente dans les autres, à moins que les impulsions ne soient entièrement confinées à l'intérieur de l'intervalle [67]. Cela ne se produit jamais en pratique, car les queues d'impulsion s'étendent toujours en dehors du créneau temporel alloué. Les interférences causées par cette superposition de champs électriques entraînent des déformations inévitables des impulsions. Il est évident que la diaphonie nuit à la qualité de la transmission, ce qui entraîne des erreurs dans le message que l'on souhaite transférer. En règle générale, afin de réduire la diaphonie (plus précisément afin d'égaliser les performances de toutes les stations de base), un système d'interférence est requis.

A savoir que des dispositifs sont mis en œuvre sous la forme des mécanismes de commutation rapide utilisés pour démultiplexer les signaux à haut débit de données et sont souvent basés sur des phénomènes de non-linéarité tels que la modulation FWM et la XPM. Cette thèse se concentrera sur le processus FWM bien qu'un aperçu rapide d'autres dispositifs soit également donné.

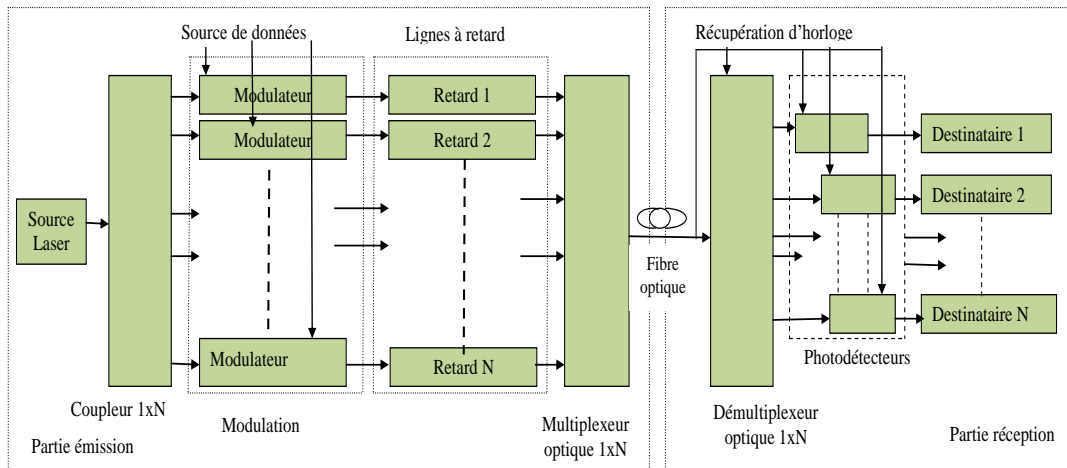


Figure 1.32 : Système d'émission et réception de l'OTDM [52]

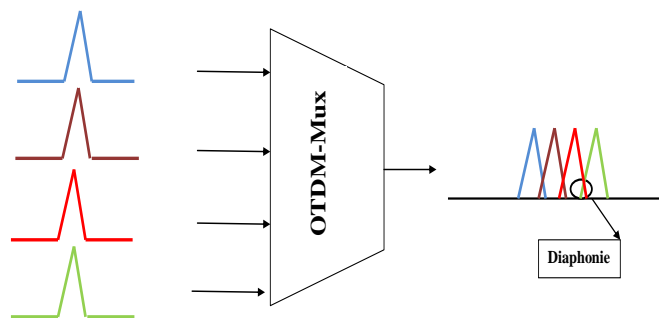


Figure 1.33 : Concept de la technique OTDM avec accentuation de la diaphonie [67]

1.5.2.4 Analyse du Signal vidéo entièrement optique dans les systèmes OTDM/DPSK

Les technologies et approches de traitement du signal jouent un rôle important dans les systèmes de communication modernes. Elles impliquent de convertir ou de transformer des données de manière à ce que nous puissions y avoir des aspects qui ne peuvent pas être perçus directement.

Les ingénieurs et les scientifiques peuvent utiliser le traitement du signal pour analyser, améliorer la qualité, réduire les interférences, optimiser la bande passante et corriger les signaux, tels que les données scientifiques, les flux audio, les images et la vidéo. Parmi les méthodes essentielles, on trouve la modulation, la démodulation, le codage et le décodage, ainsi que le filtrage et l'égalisation des signaux. L'utilisation de processeurs de signal numériques (DSP) et de modulateurs/démodulateurs à haute performance permet de traiter efficacement de grandes quantités de données tout en garantissant la robustesse du système face aux bruits et aux perturbations. Ces approches sont fondamentales pour assurer des transmissions fiables et rapides dans des environnements complexes.

Dans ce contexte, le traitement du signal dans le domaine de l'optique apparaît comme une extension naturelle et complémentaire, tirant parti des caractéristiques uniques de l'optique pour franchir les limites des systèmes exclusivement électriques.

L'utilisation des avantages du domaine optique, tels qu'une bande passante étendue et une protection contre les interférences, permet de garantir un transport et un traitement des signaux vidéo plus efficaces que dans le seul domaine électrique. Il s'agit principalement d'une méthode basée sur les conversions électrique-optique et l'emploi de techniques de multiplexage.

D'après les résultats de recherche, la combinaison de la modulation DPSK (Differential Phase Shift Keying) et du multiplexage OTDM (Optical Time Division Multiplexing), permet d'améliorer les capacités des systèmes de transmission optique haut débit, en codant à la fois la source et le canal.

L'impact de cette association (DPSK-OTDM) sur la correction d'erreurs peut intervenir : en utilisant la modulation DPSK, on peut optimiser le codage source afin d'atténuer la redondance des données avant leur transmission, ce qui permet de réduire les erreurs causées par le canal. De plus, le codage canal, qui ajoute une redondance supplémentaire pour repérer et rectifier les erreurs à la réception, est renforcé par le multiplexage OTDM. En séparant les bits dans le domaine temporel, cela permet de réduire au minimum les erreurs en rafale qui pourraient affecter des bits consécutifs dans un système DPSK classique.

Donc, cette combinaison est une solution intéressante pour l'optimisation des systèmes de transmission optique, en agissant à la fois sur le codage de source grâce à la robustesse de la DPSK aux non-linéarités [100] et sur le codage de canal grâce à la réduction des erreurs en rafale permise par l'OTDM.

Le domaine du traitement du signal vidéo optique connaît une expansion fulgurante, reposant sur plusieurs technologies essentielles pour l'amélioration de la performance, le rendement et la fonctionnalité des systèmes visuels. Les architectures matérielles telles que les FPGA (Field-Programmable Gate Arrays) et les GPU (Graphics Processing Units) permettent de traiter des images en temps réel, ce qui permet des applications qui requièrent des temps de réponse extrêmement courts, telles que les systèmes de conduite autonome. Les algorithmes de stabilisation d'image jouent un rôle crucial dans la correction des tremblements et des distorsions, assurant ainsi une qualité visuelle améliorée pour les applications professionnelles et généralistes. Les réseaux de neurones profonds, notamment l'intelligence artificielle (IA), jouent également un rôle essentiel dans des tâches telles que l'amélioration de la résolution (super-résolution), la détection d'objets et l'analyse de scènes. Finalement, la compression vidéo est l'une des technologies majeures, avec des normes comme H.264/AVC et H.265/HEVC, qui permettent de diminuer la taille des fichiers tout en préservant leur qualité, offrant ainsi une transmission et un stockage performants. Ce point sera approfondi dans le chapitre qui suit pour en expliquer les principaux enjeux.

a. Encodage et Décodage

Le phénomène du codage (ou encodage) et du décodage suscite une grande attention dans le domaine des télécommunications. Le codage fait référence à la transformation systématique d'ensembles de bits en d'autres ensembles de bits (ou de symboles en symboles). Le processus de conversion de groupes de bits en symboles est classiquement appelé codage. À l'inverse, le décodage implique principalement l'exécution de l'opération inverse, qui est conçue pour rétablir la séquence binaire d'origine. Ce processus peut être réalisé à l'aide de nombreuses méthodologies et à des fins diverses. Notre intention est simplement de présenter des concepts fondamentaux qui seront ensuite intégrés dans le cadre plus large de la thèse.

Les applications et les différentes formes d'encodage sont nombreuses, mais celles qui nous intéressent sont :

* **Correction d'erreur directe** (FEC : Forward error correction), elle consiste à améliorer la résistance du système aux erreurs causées par le bruit introduit par le système, notamment le canal optique. Il devrait être évident à ce stade que chaque fois que nous transmettons un signal optique, il y aura des pertes. En règle générale, le signal devra être amplifié avant de le recevoir. En augmentant la puissance, le système sera moins affecté par le bruit thermique. Pour cette raison, pratiquement toutes les connexions optiques sont achevées par un amplificateur optique. Les systèmes à longue distance nécessiteront l'installation d'autres amplificateurs optiques à différentes distances dans la fibre afin de préserver le signal. En optique, différents types d'amplificateurs sont disponibles, notamment les amplificateurs Raman, à semi-conducteurs (SOA) et ceux à fibres dopées à l'erbium (EDFA). Ces derniers sont largement employés comme amplificateurs en ligne dans les structures de

transmission optique, surtout pour des débits symboliques importants. Pour davantage d'informations sur ce sujet, il est recommandé de consulter [56].

Avant de transmettre, le flux binaire est divisé en segments de même longueur et des bits supplémentaires sont ajoutés pour former une redondance des données. Au niveau du récepteur, le décodeur est donc en mesure de repérer une partie des erreurs (de manière très simple, on pourrait dire que plus on ajoute de redondance, plus on peut détecter des erreurs dans un certain nombre de bits reçus), et éventuellement en corriger certaines. Lorsque la correction ne peut pas être effectuée, une retransmission est requise [101].

* **Codage gris (Grey coding)**, Le codage gris est utilisé dans les communications optiques pour optimiser les performances OSNR du système. Lorsque nous mappons nos bits en symboles, nous nous assurons que les symboles voisins sur le diagramme de constellation diffèrent pour le moins de bits possible. Intuitivement, si le bruit provoque une détection erronée, cela nous fera très probablement détecter l'un des symboles les plus proches de celui transmis [102]. Donc, moins il y a de mauvais bits, meilleur est le BER.

* **Codage différentiel**, Il est possible que les flux de bits qui traversent les multiples circuits de communication du canal soient involontairement inversés. La majorité des dispositifs de traitement du signal ne sont pas capables de déterminer si le flux entier est inversé. On désigne cela sous le nom d'ambiguïté de phase. Le codage différentiel est employé afin de prévenir cette possibilité. Cette forme de codage de protection contre les erreurs est l'une des plus simples, réalisée sur une séquence en bande de base avant la modulation.

Le Codage différentiel est une technique qui code les bits d'information en fonction de la différence entre les bits actuels et précédents, plutôt qu'en fonction de la valeur absolue des bits. Il produit les bits de sortie en analysant la variation entre les bits d'entrée actuels et antérieurs. Ces derniers sont ensuite modulés par un schéma de modulation approprié, tel que la PSK ou la QAM, pour produire les formes d'onde du signal à transmettre. Le décodeur différentiel du récepteur effectue l'opération inverse du codeur différentiel, en prenant les bits démodulés et en reconstruisant les bits d'origine sur la base de la différence entre les bits démodulés actuels et précédents. Cette idée présente un potentiel considérable pour trois motifs. En premier lieu, cela facilite la détection directe car il n'est plus nécessaire de connaître la phase du signal. Il faut simplement combiner le signal avec une version retardée de lui-même au récepteur afin d'extraire la différence de phase. Ensuite, avec l'utilisation du codage différentiel, il n'est pas nécessaire d'avoir des séquences de synchronisation dans les données. Ensuite, en ce qui concerne le bruit, ce qui est important, c'est à quel point la phase change entre deux symboles ennuyeux qui hennissent. Cela implique que l'accroissement du nombre de symboles réduit l'impact du bruit de phase, ce qui est une raison surprenante pour opter pour un codage différentiel.

D'un autre côté, à chaque fois que nous faisons une détection un peu erronée, nous aurons deux erreurs, car la suivante sera également fautive. Ainsi, le nombre d'erreurs doublera de lui-même, entraînant une pénalité de 3 dB [103].

1.5.3 Récepteurs optiques

Dans cette section, nous étudions le récepteur d'une chaîne de transmission optique. Nous nous intéressons à la partie du récepteur qui accueille le signal optique et le transforme en quelque sorte en un flux binaire dans le domaine électrique. Donc, une conversion de l'optique au numérique-électrique. Donnons d'abord un schéma général avec la figure 1.34.

En premier lieu, un filtre optique élimine le bruit hors bande, c'est-à-dire le bruit ASE à des fréquences qui ne sont pas incluses dans le spectre du signal. Ceci diminue l'intensité du bruit et ainsi augmente la sensibilité du récepteur. Un photodétecteur suit. Dans notre situation, il s'agit d'une

photodiode qui est un dispositif mesurant l'intensité de la lumière incidente et convertissant la puissance optique en signal électrique. Les dispositifs que nous considérerons sont des diodes semi-conductrices appelées photodiodes. Pratiquement, ceux-ci fonctionnent grâce à l'absorption optique, comme expliqué dans la section 1.5.1.1.

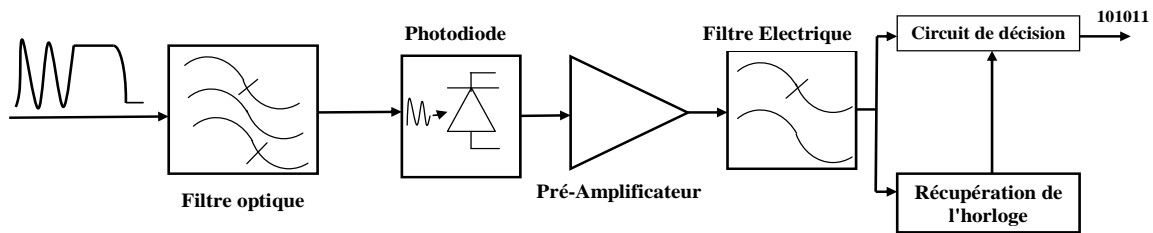


Figure 1.34 : Schéma fonctionnel simplifié, d'un récepteur de détection directe générique et d'un circuit de décision juste après le démultiplexage [67]

Dans le cas où aucun signal lumineux n'est présent au niveau de l'entrée d'une photodiode, il est toujours possible de mesurer un courant de sortie donné. C'est le courant d'obscurité, engendré par le rayonnement de fond et d'autres raisons liées à la jonction PN. Il est souvent négligeable par rapport aux niveaux de courant du signal, mais doit néanmoins être pris en compte comme une source de bruit dans le récepteur.

Alors, avant de traiter le signal électrique, celui-ci est généralement amplifié par un préamplificateur qui introduit un bruit thermique. Le photodétecteur et le préamplificateur constituent l'extrémité avant. Un filtre électrique supprime autant de bruit thermique que possible, avant que le signal ne soit divisé et que l'horloge ne soit récupérée sur un bras. L'autre bras exploite l'horloge récupérée pour échantillonner le signal et produire un train de bits. On parle alors d'un Interféromètre avec une ligne à retard DLI (delay line interferometer) qui est un élément optique permettant d'interférer avec une version retardée du signal optique. Il sera essentiel de recevoir les signaux codés de manière adéquate. Le signal est séparé en deux branches, une d'entre elles est retardée d'une période symbole, l'autre est déphasée, si besoin. Il convient de souligner que les deux coupleurs créent des écarts, comme cela est expliqué dans la section 1.5.1.2.

Comme nous allons voir aux sections ultérieures, la détection directe et la détection cohérente sont deux principales techniques des détections optiques qui peuvent être utilisées dans les infrastructures de diffusion vidéo via la fibre optique. A savoir que, cette détection dans le récepteur optique est généralement effectuée par un des types courants de photodiodes qu'elle soit **Photodiode PIN (Positive Intrinsic Negative)** qui offre une bonne réponse rapide et une faible capacitance, ce qui la rend idéale pour les signaux à haute fréquence, comme la vidéo, où bien la **Photodiode à avalanche (APD - Avalanche Photodiode)** qui offre une sensibilité plus élevée que la photodiode PIN grâce à son mécanisme de multiplication interne qui amplifie le signal optique reçu. On l'emploie souvent dans des systèmes où une détection très sensible est nécessaire, mais elle est plus complexe et coûteuse à utiliser en raison de son besoin en haute tension de polarisation et aussi le Phototransistor qui est utilisé dans certaines applications, mais il est moins courant pour les technologies de fibre optique à débit élevé en raison de sa réponse plus lente par rapport aux photodiodes. Donc, la sélection de la photodiode est déterminé par des paramètres comme le débit de données, la longueur d'onde utilisée (typique 850 nm, 1310 nm ou 1550 nm), la distance de transmission et le niveau de sensibilité requis pour le système. Les PIN et APD sont largement employés dans la chaîne de détection, car elles offrent des caractéristiques telles que leur rapidité, leur facilité d'utilisation, une bande passante électrique dépassant 60 GHz et prennent en charge l'ensemble des longueurs d'onde.

Les récepteurs peuvent être répartis en deux schémas principaux selon la détection directe ou cohérente. Bien que la détection directe a longtemps été la solution dominante dans l'industrie, la deuxième est désormais considérée par les opérateurs comme essentielle pour les systèmes modernes à haut débit, tant dans les réseaux longue distance et métropolitains que dans les réseaux d'accès à courte distance. Dans les sections suivantes, nous analyserons ces deux approches.

1.5.3.1 Détection directe

Dans ce contexte, le signal lumineux reçu est directement capté par une photodiode, qui convertit la puissance optique en courant électrique. En fait, les photodiodes produisent du bruit (quantique et thermique), ce qui signifie que le photo-courant généré comporte le signal obtenu ainsi que le bruit provoqué. Le signal optique incident produit un photo-courant s'exprimant :

$$I_{pd} = R|P_{in}|^2 \quad (1.29)$$

Où P_{in} : la puissance du signal optique incident et R : la sensibilité de la photodiode exprimée par :

$$R = \eta \frac{\lambda q}{h c} \quad (1.30)$$

Avec η : le rendement quantique de la photodiode, λ : la longueur d'onde, q : la charge d'un électron, h : la constante de Planck et c : la célérité de la lumière.

On ne détecte que l'intensité du signal reçu et on perd toute information relative à la phase. Ainsi, la détection ne peut se servir que de la modulation d'intensité, dans laquelle le signal ne communique qu'à travers sa puissance. En outre, un codage différentiel permet de recevoir correctement certaines modulations de phase facilitant la détection directe [104]. Afin d'obtenir des données concernant la phase et la fréquence du signal, il est indispensable d'avoir une source lumineuse locale au niveau du récepteur. On désigne cela sous le nom d'oscillateur local (LO). La phase de la lumière entrante doit être toujours égale à celle du LO, c'est pourquoi les récepteurs utilisant un LO sont connus sous le nom de récepteurs cohérents.

1.5.3.2 Détection cohérente

C'est un sujet très vaste et captivant, et nous ne voulons pas en aborder les détails, car une explication plus approfondie peut être trouvée dans [105]. Nous allons simplement faire une brève introduction.

Il existe au moins deux raisons d'intérêt pour la détection cohérente. En effet, cela revêt une grande importance car elle offre la possibilité de recourir à des types de modulation plus avancés comme la QAM et la PSK, ce qui permet de transporter davantage de bits par symbole et d'améliorer l'efficacité spectrale du canal à fibre optique. La sensibilité du récepteur est également améliorée grâce à cette détection, ce qui implique une diminution de l'intensité optique requise pour atteindre le rapport signal sur bruit (SNR) donné. Cela diminue l'utilisation des amplificateurs optiques et des répéteurs, ce qui peut entraîner des perturbations sonores et des distorsions. De plus, elle offre la possibilité de compenser différentes altérations, comme les diverses dispersions et les effets non linéaires, qui peuvent altérer la performance du signal durant de longues portées.

1.5.4 Les facteurs de qualité d'une transmission

Le processus de récupération de la vidéo dans un système de transmission par fibre optique implique de transformer le signal vidéo en signal optique, de le transporter via la fibre, de l'amplifier si nécessaire, puis à le reconvertir en signal électrique avant de le décoder et de le restituer. Les avancées dans le codage, la correction d'erreurs, le multiplexage et l'amplification optique permettent aujourd'hui de diffuser des signaux vidéo de haute qualité sur de longues distances, faisant de la fibre optique un élément clé des infrastructures de télécommunication contemporaines. Afin d'éviter

toute détérioration du signal pendant son passage dans la fibre optique, il est devenu essentiel d'établir des mesures pour évaluer l'efficacité d'une transmission. Généralement, ces paramètres sont mesurés une fois le signal détecté et utilisés principalement en laboratoire pour évaluer ses performances.

La méthode couramment intuitive pour évaluer les performances d'un signal consiste à examiner le diagramme d'œil qui illustre la combinaison alignée de toutes les données binaires de la séquence émise. Ce schéma varie en fonction du code utilisé, comme illustré à la figure 1.35 :

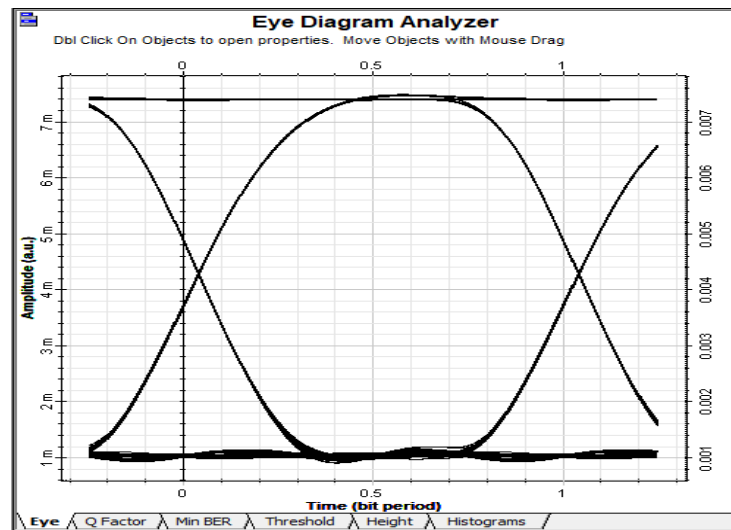


Figure 1.35 : Diagramme de l'œil obtenus à une réponse de modulation du laser à semi-conducteur [59]

Grâce à cette courbe, il est possible de représenter, dans le domaine électrique, la performance du signal en mettant en évidence les interférences entre symboles. Ces dernières résultent principalement de l'étalement temporel des impulsions du signal, dû à la dispersion ou à d'autres perturbations. Par ailleurs, l'amplitude du bruit d'émission spontanée amplifiée s'ajoute progressivement au signal tout au long de sa propagation dans la liaison. De plus, des fluctuations temporelles apparaissent en raison de la dispersion des modes de polarisation, ainsi que des interactions entre les impulsions et le bruit d'émission spontanée amplifiée.

La performance d'un canal de communication est influencée par le facteur de qualité Q aussi connu sous le nom facteur de qualité en amplitude. Pour les communications optiques binaires ou numériques, le facteur Q désigne la relation entre signal et bruit optique (SNR), ce qui simplifie l'analyse des performances du système [106]. Pour identifier le signal à repérer, on se sert des caractéristiques statistiques du bruit, en particulier les valeurs moyennes et les différences typiques entre les niveaux "0" et "1". On distingue deux méthodes pour calculer le facteur Q :

La première méthode définit Q par la relation suivante :

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (1.31)$$

Où I_1 et I_0 représentent les valeurs moyennes des niveaux "0" et "1" du signal, tandis que σ_1 et σ_0 correspondent à leurs écarts-types respectifs. Le calcul numérique du facteur Q est également lié au taux d'erreur binaire (BER), s'effectue à l'aide de la formule suivante :

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \quad (1.32)$$

Comme le concept de communication numérique consiste à transmettre des informations sous forme numérique d'une source qui produit l'information à une ou plusieurs destinations. Dans l'analyse et

la conception des systèmes de communication, il est crucial d'examiner les caractéristiques des canaux physiques par lesquels l'information est transmise [107].

Lors d'un transfert numérique, le taux d'erreur binaire correspond au niveau des erreurs dans la transmission des données causé par un matériel obsolète ou des liaisons bruyantes. La transmission ou le transfert de données est moins fiable lorsque ce taux est élevé.

En télécommunications, le TEB représente le rapport entre le nombre de bits erronés et le nombre total de bits reçus lors d'une transmission, que l'on exprime généralement par une puissance négative de dix [108]. Dans la plupart des cas, sans avoir connaissance de ce nombre total de bit transmis, on utilise la probabilité d'erreur binaire. Pour déterminer la qualité à atteindre dans une transmission numérique, on utilise ce qu'on appelle le BER (Bit Error Rate) exprimé par :

$$\text{BER} = \frac{N_{be}}{N_{bt}} \quad (1.33)$$

Où N_{be} représente la quantité de bit erroné et N_{bt} celle des bits transmis.

1. 6 Conclusion

Le domaine des communications optiques a connu un développement rapide, transformant en profondeur la manière dont nous transmettons et partageons l'information. Ce chapitre a mis en évidence les avancées majeures réalisées dans les réseaux d'accès à fibre optique, en expliquant les technologies qui permettent aujourd'hui d'offrir des services multiservices sur une même infrastructure. Le progrès remarquable des technologies de transmission optique est étroitement lié aux avantages uniques de la fibre optique, notamment sa large bande passante, sa faible perte de propagation, sa résistance aux interférences électromagnétiques et sa capacité de multiplexage. Une explication détaillée des composants essentiels d'une liaison optique multiplexée a été présentée. Les prochains chapitres approfondiront ces concepts en explorant les technologies de transport optique et de multiplexage, ainsi que les méthodes de modélisation utilisées pour analyser les performances des systèmes proposés.

Chapitre 2 : Les encodeurs vidéo et la bande passante internet

2.1 Introduction

L'augmentation du besoin en contenus vidéo, les avancées en matière d'électronique grand public et l'optimisation des services de vidéo à la demande ont considérablement favorisé une hausse notable du trafic audiovisuel en ligne, qui pourrait constituer plus de 75% du total des informations transmises [109]. Donc, Dans un monde où les contenus vidéo règnent la consommation numérique, la gestion performante des ressources réseau est devenue décisif. Depuis l'année 2019, nous vivons une situation grave et inédite, la pandémie du coronavirus covid-19. Pour limiter la propagation du virus, des mesures de sécurité ont été prises partout dans le monde, c'est le confinement. Ceci a conduit à l'utilisation fulgurante du trafic internet (télétravail, vidéoconférences, vidéos à la demande, jeux, ... etc.). D'après le rapport annuel mené par la société Sandvine [110], divers services utilisés sur internet représentés une consommation de bande passante assez importante. Le rapport estime que le service streaming vidéo représentait plus de 58% du trafic Internet mondial. Concrètement, ce sont les flux haute définition et très haute définition qui sont visés. Alors plusieurs plateformes ont décidé de réduire cette consommation avec des diverses stratégies : YouTube et Amazon ont décidé de limiter le format de vidéo (par défaut à la version standard 480p, plutôt que la 4K-UHD ou HD 1080p). Netflix, Amazon Prime Vidéo et Disney+ ont choisi d'augmenter la compression des vidéos (pour réduire le bitrate). Facebook et son service photo Instagram a décidé de les suivre plus de compression dans les vidéos [111].

A l'heure actuelle, le streaming vidéo se base sur un ajustement dynamique à la bande passante disponible. En d'autres termes, cela implique que le système modifie en temps réel la qualité de la vidéo en se basant sur les conditions du réseau. Par exemple, en cas de ralentissement de ce dernier (comme un débit réduit), la qualité de la vidéo est automatiquement diminuée (en passant d'une haute qualité à une résolution moindre) afin d'éviter des interruptions de lecture. Des technologies de streaming adaptatif permettent d'effectuer cette adaptation. Elles fragmentent la vidéo en petits segments de diverses qualités (480p, 720p ou 1080p) et chargent dynamiquement le segment qui correspond le mieux à la bande passante disponible au moment de la lecture.

Cependant, la transmission de vidéos via un réseau de communication dépend fortement des performances du canal utilisé. Les paramètres de ce dernier, tels que la latence (délai de transmission), la perte de paquets (données manquantes lors de la transmission) et la variation de débit, ont un impact direct sur le fonctionnement du CODEC vidéo de bout en bout [112]. Cette situation a démontré la nécessité du développement de codecs de compression vidéo à hautes performances. Cette nouvelle génération d'encodage, promet de réduire la taille des vidéos de la même manière que l'encodage H.264 qui a contribué à l'explosion du streaming en full HD, et le codec HEVC (High Efficiency Video Coding), également connu sous le nom de H.265, qui est au cœur du passage à la 4K et la 8K dont son objectif principal est de permettre une compression considérablement améliorée et performante par rapport aux normes existantes [113].

Dans ce chapitre, nous présentons d'abord les concepts de base essentiels liés à la représentation vidéo, en abordant les principes fondamentaux de la compression et les méthodes d'évaluation de la qualité. Nous nous pencherons sur une analyse détaillée des aspects opérationnels des algorithmes et des systèmes au sein de la norme de codage vidéo HEVC, qui constitue un point central à optimiser, en explorant les bases du processus d'encodage et de décodage, ainsi que l'évolution des normes dans ce domaine. Une compréhension approfondie des algorithmes sous-jacents, régis par les paramètres utilisés dans le processus d'optimisation, est essentielle pour formuler des jugements éclairés dans le cadre de la recherche menée.

2. 2 Travaux connexes

La prédiction et le codage sont considérés comme les principales étapes dans le domaine de la compression d'images. L'efficacité du codeur dépend de sa capacité à réduire la longueur de code de l'image résiduelle, qui est la différence entre l'image prédite et l'image originale [114]. Le (HEVC) a fait son apparition comme une nouvelle norme de codage vidéo qui prend en charge deux types de prédiction, à savoir l'intra-prédiction et l'inter-prédiction. Ils offrent une grande flexibilité pour faciliter le processus de codage. L'intra-prédiction repose sur les informations de la trame I dans le processus de prédiction. Pour améliorer la précision de l'intra-prédiction, les modes d'intra-prédiction, le HEVC intègre désormais 35 modes différents, et les unités de prédiction (PU) peuvent être divisées en un minimum de 4×4 Pixels [115].

Plusieurs études dans la littérature ont proposé des méthodes de partitionnement rapide des unités de codage (UC) et de sélection des modes de prédiction pour accélérer ce processus et pour réduire le débit binaire tout en maintenant la qualité de l'image. Jiang et al [116] ont proposé un algorithme de décision intra-mode rapide pour HEVC dont il utilise l'information de gradient qui réduit le nombre de modes candidats pour les processus RMD (processus de décision de mode approximatif) et RDO (processus d'optimisation du taux de distorsion). L'algorithme proposé permet une réduction significative du temps de codage avec une perte négligeable de l'efficacité du codage. Les auteurs dans [117] ont conçu une étape de prétraitement rapide des images basée sur les informations relatives aux bords. Sur cette base, une taille raisonnable de l'unité centrale est décidée efficacement, l'opérateur de Sobel a été utilisé pour dériver les directions de gradient des pixels et réduire les modes de prédiction déraisonnables. L'optimisation de la sélection du mode intra-prédiction a entraîné une réduction de la complexité de calcul, une augmentation du taux de BD (Bjontegaard-Delta Rate) et une diminution de la BD-PSNR (Bjontegaard-Delta Peak Signal-to-Noise Ratio) qui sont presque négligeables. De même dans [118], les auteurs ont adopté une méthode de décision de mode rapide qui utilise un algorithme conçu sur une étape de prétraitement d'image rapide basée sur l'information de bord ou il permet la réduction de la complexité de calcul par rapport au HEVC original, l'augmentation de BD-Rate et la diminution de BD-PSNR. Les auteurs dans [119] se sont concentrés sur les économies de débit sans changer la complexité de calcul du meilleur mode de prédiction parmi les 35 modes d'intra-prédiction basés sur l'analyse de gradient. Dans [120], les auteurs ont proposé un algorithme basé sur le gradient pour la détection des bords en utilisant le filtre de Prewitt dans le but d'améliorer l'efficacité de la compression du codage vidéo et de minimiser la dégradation de la qualité vidéo pour QCIF. Les auteurs dans [121] ont proposé une méthode basée sur le concept d'amélioration de la qualité visuelle de la vidéo codée intra- et inter-trame en améliorant sélectivement certains chemins dans l'arbre de codage HEVC et une technique de filtrage adaptatif appliquée à chaque chemin sélectionné afin d'améliorer sa qualité.

La plupart des méthodes ci-dessus sont conçues soit sur le partitionnement d'unités, soit sur la réduction du mode de prédiction, soit avec de faibles résolutions qui permettent de réduire la complexité de calcul, donc de gagner du temps de codage et de minimiser la dégradation de la qualité vidéo pour différentes résolutions. Malheureusement, tous ces objectifs sont en conflit les uns avec les autres. L'amélioration d'un objectif se fait au détriment des autres, et chaque technologie à ses avantages et ses inconvénients.

Les applications de compression qui requièrent essentiellement des scénarios de compression sans perte incluent l'imagerie médicale, la vidéosurveillance et le streaming vidéo entre autres. Dans ces domaines, la reconstruction du contenu doit être parfaitement fidèle, ce qui nécessite des résolutions hautes définition. Ainsi, il est essentiel de comprendre que la prédiction intra doit être au centre de la recherche, où l'accent doit être mis sur son exécution sur différents modes de sélection. Ces problématiques sont au cœur de notre étude, qui se concentre sur l'encodeur HEVC en tant que solution pour réduire la latence et dépasser les performances de compression des normes actuelles.

Pour approfondir ces aspects, la section suivante détaille les principes fondamentaux des techniques de compression vidéo.

2.3 Formats de représentation vidéo et Compression

L'évolution vers les formats numériques a touché tous les champs de la technologie vidéo. On obtient une animation fluide en diffusant une séquence d'images à une cadence suffisamment rapide, exprimé en images par seconde (fps). L'œil humain perçoit un mouvement constant dès 10fps. La qualité des vidéos est également influencée par la résolution, c'est-à-dire le nombre de pixels par image. Une résolution élevée favorise la clarté visuelle. La qualité des données transmises et stockées est directement affectée par le fps et la résolution, ce qui requiert un équilibre entre une qualité optimale et des contraintes techniques.

Au début de la décennie 90, les standards de compression JPEG et MPEG ont transformé radicalement le monde des images numériques, simplifiant leur transmission et leur propagation dans les domaines de l'informatique et de la télévision. On peut générer une image numérique, en format binaire, grâce à des appareils optiques comme un scanner, appareil photo ou des logiciels. La vidéo numérique s'appuie sur un échantillonnage temporel et spatial, captant des scènes à intervalles réguliers pour générer un mouvement fluide, établissant de ce fait les fondements des technologies visuelles modernes.

2.3.1 Format des vidéos numériques

Pour normaliser la compression de la vidéo numérique, le groupe de spécialistes de l'UIT a recommandé des formats qui sont essentiels aux standards de compression vidéo et largement utilisés dans les applications actuelles. Le tableau 2.1 récapitule les paramètres de formats vidéo numériques standards. Le débit binaire nécessaire pour les transmissions de données non compressées est calculé pour un format 4:2:0 avec 8Bits par composant.

Tableau 2.1: Les paramètres des formats vidéo numériques standard [126]

Définitions	Résolutions	Balayages	Fréquences	Débits
QCIF	176 × 144	Progressif	10 à 30 Hz	380ko à 1,1Mo/s
CIF	352 × 288	Progressif	10 à 30 Hz	1,5ko à 4,6Mo/s
SD (NTSC)	640 × 480	Entrelacé	60 Hz	13,8Mo/s
SD (PAL,SECAM)	768 × 576	Entrelacé	50 Hz	16,6Mo/s
SD(DVD)	720 × 576	Entrelacé	50 à 60 Hz	15,6 à 18,6Mo/s
HD(720p)	1280 × 720	Progressif	24 à 60 Hz	33,2 à 83 Mo/s
HD(1080i)	1920 × 1080	Entrelacé	50 à 60 Hz	78 à 93 Mo/s
HD(1080p)	1920 × 1080	Progressif	24 à 30 Hz	75 à 93 Mo/s

Cependant, la diffusion de vidéo numérique non compressée exige une bande passante importante, souvent au-delà des capacités des réseaux disponibles. Par exemple, les réseaux à large bande proposent des vitesses allant jusqu'à 10 Mbps, tandis que les connexions par satellite ou Internet se limitent à 1-2 Mbps. Pour surmonter cette contrainte, il est indispensable de compresser la taille des données vidéo pour en améliorer leur transmission. La compression offre la possibilité de minimiser l'espace occupé par les données tout en préservant une qualité acceptable, rendant ainsi la transmission vidéo possible dans les limites des bandes passantes disponibles. A titre d'exemple, la définition spatiale d'une image extraite d'une vidéo, d'une heure en résolution 720×480 à 30fps nécessite environ 56Go de stockage, ce qui souligne la nécessité de techniques de compression pour réduire la taille des données. En outre, la standardisation du codage vidéo assure la compatibilité et une décompression efficace pour les utilisateurs.

2. 3. 2 Les espaces de couleurs

La représentation des images dans différents espaces de couleurs a conduit à la création de plusieurs modèles colorimétriques, chacun possédant des propriétés spécifiques. Parmi les espaces de couleurs les plus utilisés, on retrouve le **RVB** (Rouge, Vert, Bleu) définit les couleurs à partir de trois composantes primaires. La combinaison maximale de ces trois couleurs produit du blanc, tandis que leur absence totale donne du noir. Ces composantes sont interdépendantes. Des études récentes ont montré que l'espace RVB reste fondamental pour les écrans numériques et les systèmes d'affichage modernes [122]. Le second, le **HSV** (Hue, Saturation, Value) se base sur trois paramètres : la teinte (Hue), la saturation et la valeur (Value). La teinte correspond à la fréquence dominante de la couleur, représentée par un angle sur le cercle chromatique. La saturation indique la pureté de la teinte, variant entre 0 % (gris) et 100 % (couleur vive). La valeur (Value) mesure la clarté, allant du noir (0) au blanc (1). Cet espace est largement utilisé dans les applications de traitement d'image pour sa simplicité et son intuitivité [123]. Et le troisième est l'espace **YUV**, également appelé YCrCb, principalement utilisé pour la vidéo analogique. Il se compose de trois composantes : la luminance (Y), qui représente l'information en noir et blanc, et deux composantes de chrominance (U et V), qui codent la couleur. Les relations mathématiques entre ces composantes et les couleurs RVB sont les suivantes :

$$Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B \quad (2.1)$$

$$U = -0.147R - 0.289G + 0.436B \quad (2.2)$$

$$V = 0.615R - 0.515G - 0.100B \quad (2.3)$$

Ainsi U est parfois noté Cr et V noté Cb, d'où la notation YCrCb.

Des travaux récents ont montré que l'espace YUV est essentiel pour la compression vidéo, notamment dans les codecs modernes comme le H.265/HEVC [124].

2. 3. 3 Concepts de Base en Compression Vidéo

Face à la grande quantité de données vidéo HD et UHD, une première compression est indispensable en tirant parti de la redondance psycho-visuelle. Comme le système visuel humain est plus réceptif à la luminance qu'à la couleur, on procède à un sous-échantillonnage des composantes Cr et Cb afin de minimiser le volume d'informations. Cette méthode offre la possibilité de réduire le volume des données tout en préservant l'essentiel de la perception visuelle, notamment par l'emploi de différents formats de sous-échantillonnage [124] ou on distingue ceux qui sont soutenues par les récentes normes de compression vidéo (Figure 2.1):

- **Format (4:4:4):** Principalement utilisé dans les conceptions audiovisuelles, il préserve tous les éléments sans procéder à un sous-échantillonnage, assurant ainsi un encodage permanent de la chrominance.
- **Format (4:2:2):** Les deux composantes de chrominance englobent autant de lignes que la luminance, alors que seulement la moitié de colonnes, ce qui entraîne un sous-échantillonnage par facteur de 2.
- **Format (4:2:0):** est souvent employé dans les applications destinées au grand public, comme la télévision numérique et le stockage. Il diminue la taille des données des éléments de chrominance Cb et Cr par un facteur de 4. Par conséquent, le nombre de colonnes et de lignes en chrominance est la moitié de celui en luminance.

H265 prend en charge les formats 4:2:0, 4:2:2, et 4:4:4, avec un usage courant du 4:2:0 dans les applications de streaming et de stockage.



Figure 2.1 Format des sous-échantillonnages [125]

2. 3. 4 Décomposition et partitionnement du signal vidéo

Le principe de base de la compression vidéo est la prédiction entre des images adjacentes (Figure 2.2).. Une séquence vidéo est généralement structurée en GOP (Group Of Pictures) qui est une suite d'image codée en trois types de trames dans un codeur hybride : des trames Intra-trames (trames I), des trames prédites vers l'avant (trames P) et des trames prédites bidirectionnelles (trames B).

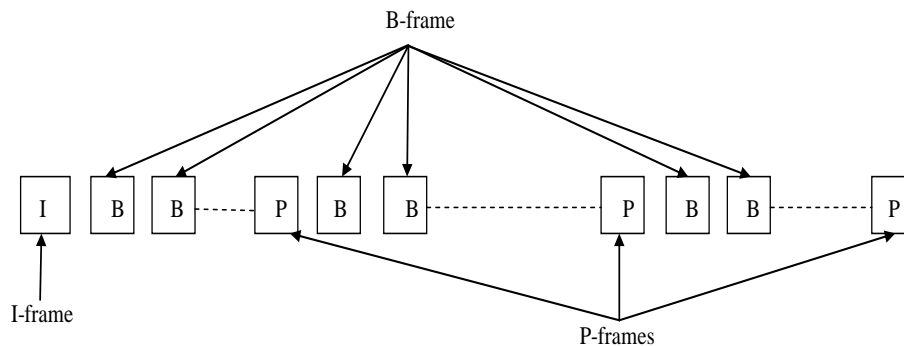


Figure 2.2 Structure d'un groupe d'image

- **Les images I** (Intra-frames): Une trame prédite Intra est autonome, codées sans référence à d'autres images. Elles s'appuient exclusivement sur une prédiction spatiale intra-image, analysant les pixels voisins au sein de la même trame. Plus il y a d'images I contenues, meilleure est la qualité de la vidéo; cependant, les images I contiennent le plus grand nombre de bits et utilisent donc plus d'espace sur le support de stockage.
- **Les images P** (P-frames): Les images inter-prédites sont reconstruites en utilisant des images de référence précédentes, grâce à des vecteurs de mouvement et des résidus. Elles peuvent également servir de référence pour d'autres prédictions. Les trames P, par exemple, sont générées à partir de la dernière trame I ou P utilisée comme référence. Elles ne contiennent que les données ayant changé par rapport à cette trame de référence, ce qui permet d'optimiser la compression.
- **Les images B** (B-frames ou bi-prédicatives): bidirectionnelles; prédites à partir de deux références, une dans le passé et une dans le futur, images I et P. Les trames B contiennent uniquement les données qui ont changé par rapport à la trame précédente ou qui sont différentes des données de la trame suivante utilisée comme référence.

2. 3. 5 Techniques de compression

La compression vidéo (ou codage vidéo) vise à réduire les redondances spatiales et temporelles dans un flux vidéo afin d'optimiser leur transmission sur des réseaux à bande passante limitée ou leur stockage sur des supports de capacité réduite. Ce processus utilise un algorithme d'encodage pour éliminer les informations superflues et générer un flux compressé, tandis qu'un algorithme inverse (décodage) restitue la vidéo dans un état proche de l'original. L'ensemble de ces opérations, combinant compression et décompression, constitue un codec vidéo. Ce système, intégrant à la fois

un codeur et un décodeur, permet ainsi de minimiser la taille des flux binaires tout en préservant la qualité du contenu source.

2. 3. 6 Principe de codage vidéo

Le schéma fonctionnel général d'un système de codage vidéo est illustré à la figure 2.3. Un codec vidéo compresse une image source ou une séquence vidéo, puis la décompresse pour produire une copie ou une version similaire du contenu original. Le codec convertit la séquence d'entrée en un flux de bits codifiés, après que la source vidéo ait été traitée dans une phase de prétraitement, et le conditionne dans un format approprié avant la transmission sur le canal. La compression est dite sans perte si la séquence décompressée correspond exactement à l'original et avec perte si des différences apparaissent. Le codec génère un modèle de la séquence d'origine, dans le but de réduire l'utilisation des bits tout en préservant une précision optimale.

Cependant, concilier ces deux exigences est complexe, car une compression plus élevée peut dégrader la qualité de l'image lors du décodage. Ce dernier consiste à reconstruire la séquence vidéo à partir du train binaire reçu. Un post-traitement peut ensuite être appliqué pour adapter l'image à l'affichage. Une fois ces étapes terminées, la vidéo est prête à être visionnée.

Un modèle générique constitué de blocs de traitement en cascade représente la majorité des standards de codage vidéo. Ce codeur intègre des fonctionnalités suivantes : la transformation (T), la quantification (Q), l'estimation de mouvement (ME), la compensation de mouvement (MC) et le codage entropique (figure 2.3). Ces différentes fonctions seront décrites en détails dans le cadre de la présentation des normes HEVC/H 2.65.

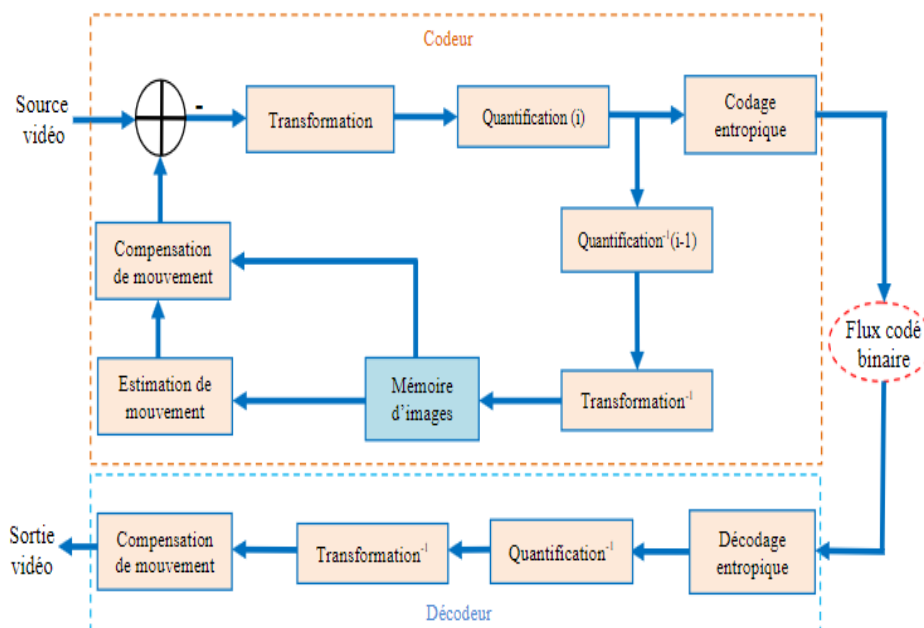


Figure 2.3 Processus de compression/décompression vidéo [124]

2. 3. 7 Les Types d'encodeurs vidéo

Les encodeurs d'une norme spécifique peuvent différer d'un fournisseur à l'autre, voire même d'un produit à l'intérieur du même fournisseur. Cette fluctuation est due à la manière dont l'élaborateur envisage d'améliorer des sections spécifiques de la norme en utilisant diverse outils. Lors de la conception, divers aspects peuvent être considérés, y compris les performances de l'appareil, les éléments commerciaux, le design et l'élaboration, les propriétés physiques de l'appareil ainsi que sa souplesse. Un encodeur vidéo intègre trois éléments fonctionnels majeurs : un modèle de prévision, un modèle spatial et un encodeur à entropie, comme le démontre la figure 2.3. Il gère les

informations en plusieurs étapes, telles que la prédiction, la transformation et l'encodage, afin de les condenser en un flux binaire plus réduit. Les processus primaires sont élaborés pour être réversibles et pour produire une quantité de données inférieure à celle du flux binaire initial. Pour des informations supplémentaires, consultez [124] [126].

Le codage vidéo hybride illustré par la figure 2.3, utilisé dans les normes MPEG-x et H.26x, repose sur une boucle fermée exploitant les données déjà encodées pour traiter le contenu courant. Sa structure standardisée (prédiction, transformation, codage binaire) assure la compatibilité entre codeurs, tandis que les modules variables permettent une adaptation aux besoins spécifiques. Cette combinaison de rigidité et de flexibilité explique son adoption universelle dans les standards de compression modernes [126].

2.3.7.1 Normes et standards

L'objectif des normes est de garantir la cohérence entre encodeur et décodeur, tout en laissant aux producteurs la liberté de concevoir des articles novateurs et concurrentiels. Un standard ne spécifie pas un encodeur, mais le résultat qu'un encodeur doit délivrer. En d'autres termes, il concerne la syntaxe du flux et la façon de le déchiffrer. Il est indispensable de mettre en place des normes pour uniformiser les processus et simplifier la diffusion de vidéos ainsi que l'interopérabilité entre différents fabricants et fournisseurs de contenu. Le tableau 2.2 résume les normes de compression vidéo majeures et leurs utilisations.

Tableau 2.2: Norme de compression vidéo [128]

Standard	Applications
MPEG 1	Vidéo-CD, CDI
MPEG 2	Télévision numérique, Satellite, TNT, TV Haute Définition, DVD
MPEG 4 Visual	Internet, vidéo mobile, VOD (video on Demand) ,Studio
MPEG 4 AVC H.264	Internet, vidéo mobile, Haute Définition, VOD ,Studio
H.265/HEVC	Smartphone ,Tablette,TV4K

2.3.7.2 Évolution des Normes de Compression Vidéo

Avec l'essor des applications vidéo, la nécessité d'une compression efficace s'est accrue, conduisant au développement de plusieurs normes par les organismes internationaux ITU-T et ISO. L'ISO a introduit le MPEG-1 en 1992 pour la compression de vidéos de basse résolution avec un débit de 1,5 Mb/s. En 1994, le MPEG-2 a été conçu pour offrir un débit plus élevé, répondant aux besoins de la télévision numérique. L'ITU a développé le H.261 en 1990 pour la transmission vidéo, suivi du H.263 en 1995, qui a évolué avec les versions H.263+ et H.263++ en 2000, optimisant la compression pour les transmissions à bas débit.

En collaboration, l'ISO et l'ITU ont créé le H.264/AVC en 2003, adopté pour les disques Blu-ray et la vidéo HD. En 2013, le H.265/HEVC a amélioré l'efficacité de compression de 50 % tout en prenant en charge la 4K et la 8K avec un taux d'affichage allant jusqu'à 120 images par seconde. Les deux figures (Figure 2.4) et (Figure 2.5) illustre les informations citées.

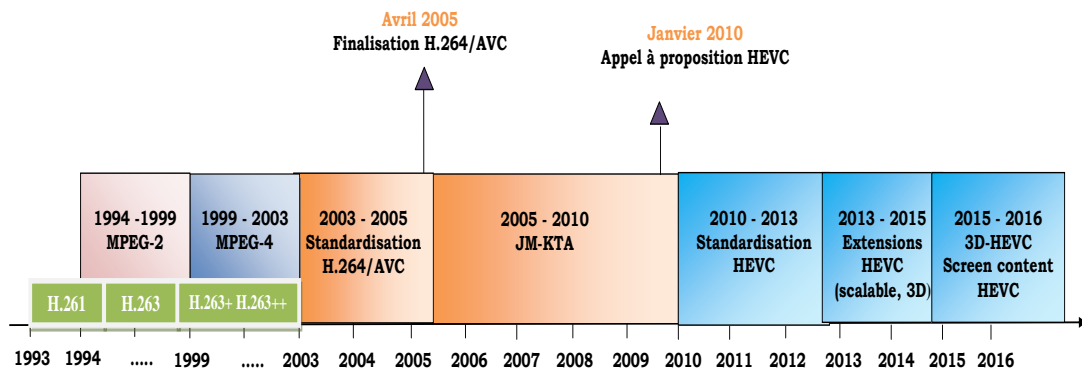


Figure 2.4 Evolution des codeurs vidéo [124]

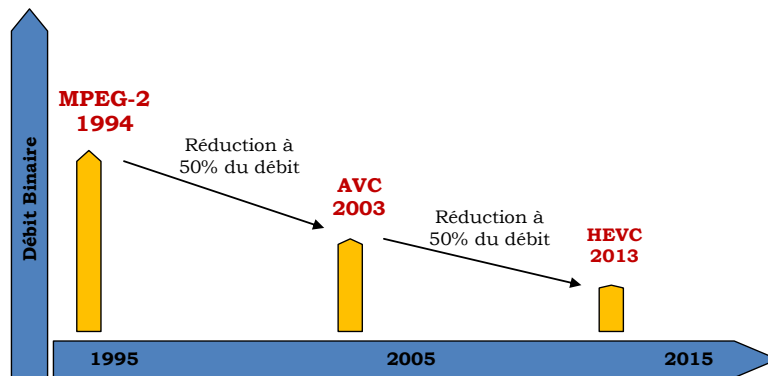


Figure 2.5 Les fluctuations de débit pour les normes vidéo [124]

2. 4 H.265/HEVC

Développée en 2013 par le groupe JVT, Le codage vidéo à haute efficacité (HEVC), également appelé H. 265, incarne une progression importante dans le domaine de la compression vidéo. Cela permet de diminuer la dimension des fichiers et des flux vidéo de 50 % par rapport au H.264/AVC et de 75% en comparaison au MPEG-2[124][126], tout en conservant une qualité d'image semblable. Cependant, cela nécessite une puissance de calcul supplémentaire, qui peut être 2 à 10 fois supérieure. La nouvelle norme promet des économies de bande passante de 20 à 60% par rapport à son prédécesseur. Cette optimisation réduit les frais de stockage et de transmission, permettant ainsi la diffusion de contenus en haute résolution. HEVC s'appuie sur des techniques de pointe telles que la prédiction temporelle et spatiale, la DCT, la quantification et le codage entropique CABAC (Context Adaptive Binary Arithmetic Coding). Il supporte les vidéos en 4K et 8K avec un taux de rafraîchissement pouvant monter jusqu'à 120 images par seconde, favorisant ainsi l'expansion des formats d'ultra-haute définition.

2.4.1 Aperçu de la norme de codage vidéo

Le H.265/HEVC adopte une approche hybride combinant l'exploitation des redondances spatiales et temporelles avec la transformation du signal vidéo. Il assure une compression optimisée, indépendamment du niveau de résolution, offrant une performance améliorée notamment pour les vidéos en Ultra HD. La figure 2.6 illustre l'architecture de cette norme.

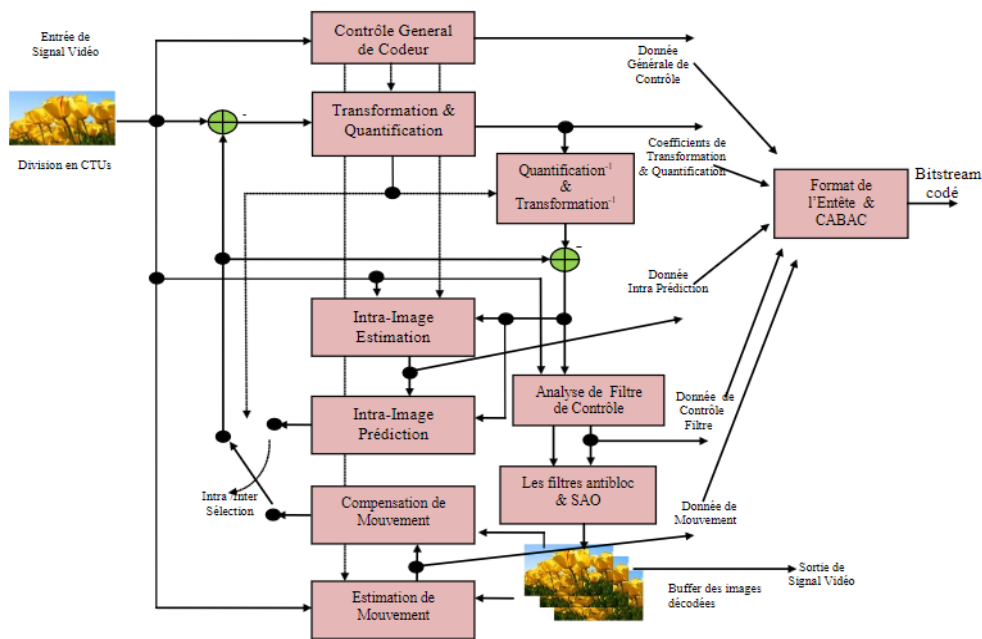


Figure 2.6 schéma fonctionnel d'un encodeur HEVC avec décodeur intégré [129]

2.4.2 Structuration de la norme HEVC

La norme H.265/HEVC ne normalise que le décodage, laissant aux développeurs le choix des paramètres d'encodage. L'encodeur sélectionne les outils de codage les plus adaptés en fonction des besoins et des applications. À cet effet, la norme HEVC est structurée en niveaux et profils [124] [131].

2.4.2.1 Profils

- **Main** : Utilisé pour la majorité des applications, avec un sous-échantillonnage 4:2:0 et une profondeur de 8Bits par échantillon.
- **Main Still Picture** : Permet le codage d'images fixes, utile pour la photographie et l'extraction d'images depuis des vidéos.
- **Main 10** : Offre une profondeur de couleur allant jusqu'à 10Bits pour une meilleure fidélité et un rendu plus précis des couleurs.
- **Profils d'extension** : Depuis 2013, plusieurs extensions ont été ajoutées, incluant des profils évolutifs (scalable), multi-vue (multi-view) et 3D [131].

2.4.2.2 Niveaux

Les niveaux définissent la résolution, la fréquence d'image et le débit binaire :

- **Niveau 1** : Faible résolution (176×144) à 15 fps.
- **Niveau 2 et 2.1** : Résolutions 352×288 et 640×360 à 30 fps.
- **Niveau 3 et 3.1** : Jusqu'à 1280×720 à 33.7 fps.
- **Niveau 4.1** : Supporte le Full HD (1920×1080) à 60 fps.
- **Niveau 5 et 5.1** : UHD (4K) à 32-64 fps avec un débit allant jusqu'à 60 Mbit/s.
- **Niveau 6.1 et 6.2** : Résolution 8K (8192×4320) à 120 fps.

HEVC permet ainsi une flexibilité et une efficacité accrues, adaptées aux besoins des contenus modernes, du streaming à la vidéo 8K.

2.4.2.3 Configurations

La figure 2.7 [131] illustre les trois configurations principales définies par la norme HEVC. Dont, elles comprennent divers groupes de prédiction, élaborés pour évaluer les performances du codec.

- **Tout intra (All Intra)** : Ce paramétrage se base uniquement sur la prédiction intra pour le codage des images, en employant simplement la prédiction spatiale. Celle-ci se caractérise par une durée minimale et une complexité diminuée.
- **Accès aléatoire (Random Access)** : Cette mise en place emploie une structure de prédiction hiérarchique bidirectionnelle afin d'optimiser l'efficacité de la compression. Toutefois, cela provoque un retard significatif en raison du réarrangement des images.
- **faible délai (Low Delay, LDP, LDB)** : Elle s'appuie sur le nombre d'images de référence. Dont, La première est codée en mode intra (I), alors que les images suivantes sont prédite (P) ou bidirectionnel (B). Elle propose une compression très efficace et un délai de latence réduit, mais cela entraîne une complexité supplémentaire.

Dans notre travail, nous avons adopté la configuration Tout intra pour assurer une codification rapide avec un débit élevé et une complexité faible.

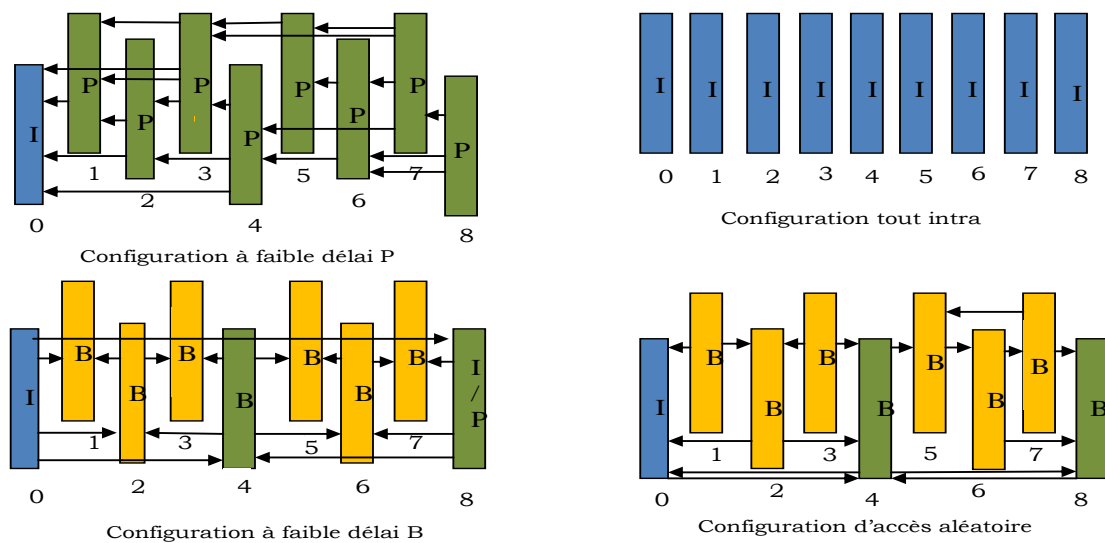


Figure 2.7 Configuration principale du HEVC [131]

2.4.3 Structure de codage

Le HEVC met en œuvre une nouvelle approche de segmentation des images vidéo, basée sur une structure arborescente quaternaire (quadtree). Il remplace les macroblocs traditionnels par des unités de codage appelées **CTU** (Coding Tree Units) de 64×64 Pixels, une progression par rapport au H.264 qui se servait de blocs de 16×16 Pixels. Ils sont composés d'un **CTB** (Coding Tree Block) luma et de deux **CTBs** chroma dont la taille varie entre 16×16 et 64×64 Pixels. Ces blocs sont ensuite partitionnés en **CBs** (Coding Blocks) dont la taille peut aller de 8×8 à 64×64 Pixels.

Pour la compression des images, on définit trois unités principales :

- **CU** (Unité de Codage) : qui divise la séquence vidéo en blocs de dimensions variables (de 8×8 à 64×64 Pixels).
- **PU** (Unité de Prédiction) : dont la dimension varie en fonction du type de prédiction. L'intra-prédiction se limite à l'utilisation de tailles symétriques, alors que l'inter-prédiction supporte aussi bien les tailles symétriques qu'asymétriques.
- **UT** (Unité de Transformation) : elle détermine la taille des blocs utilisés pour la transformation et la quantification. Elle peut varier de 4×4 à 32×32 Pixels [129] [130].

Cependant, ce standard propose un partitionnement plus flexible et permet l'utilisation de blocs plus grands, améliorant ainsi l'efficacité du codage, notamment pour les vidéos en haute résolution comme la 4K. Selon la complexité de l'image, le niveau de partitionnement ou de profondeur peut

fluctuer entre 0 et 4. Ainsi, la division en UC d'une même image dépendra de la taille de cette dernière.

La détermination des paramètres de quantification (QP) et du partitionnement se fait en fonction de l'information présente dans chaque bloc. Effectivement, les unités de calcul dotées de zones homogènes renferment moins d'informations et un faible degré de profondeur ou une simple partition suffira pour le codage. En revanche, les UC comportant des textures détaillées sont toujours divisées en plusieurs niveaux de profondeur afin de refléter de manière spécifique l'information du bloc. La figure 2.8 présente le processus de partitionnement d'une séquence vidéo selon le standard HEVC.

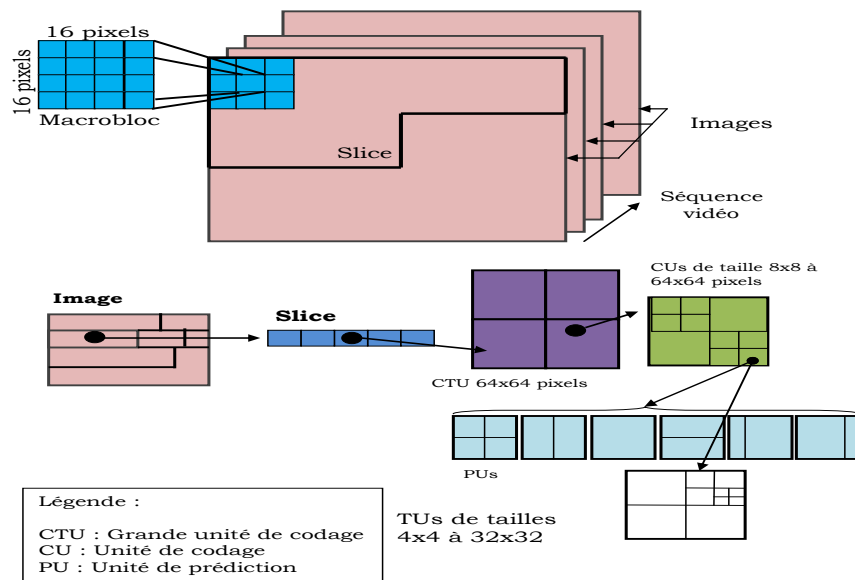


Figure 2.8 Partitionnement dans la norme HEVC [124]

2.4.4 Généralité sur la prédiction du HEVC

Le concept de compression vidéo consiste à exploiter les redondances spatiales et temporelles d'une séquence vidéo en effectuant des prédictions. Comme indiqué dans la section 2.2, les modèles de prédiction constituent l'une des unités fonctionnelles intégrées au codeur HEVC. De même qu'avec les normes de codage vidéo antérieures, ce modèle est réparti en deux configurations de prédiction : Le Modèle de Prédiction Temporelle ; Modélisation de la Prédiction Spatiale.

Dans le modèle de prédiction temporelle, la trame en cours est calculée sur la base des données provenant de deux trames adjacentes, connues sous le nom de trames de référence. En général, ces trames font référence à la trame qui précède juste la trame actuelle et à celle qui vient après. Cette technique, connue sous le nom de prédiction Inter, utilise les corrélations temporelles entre les séquences d'images pour prévoir et rectifier les mouvements de pixels, en s'appuyant sur les ressemblances entre les images successives. De même, le modèle de prédiction spatiale (également appelé prédiction Intra) utilise les pixels déjà traités dans le cadre du même contexte pour prévoir les échantillons de la zone étudiée. Cette approche exploite les répétitions spatiales locales entre des pixels adjacents au sein d'une même image. La section suivante comportera une analyse détaillée de ce mode de fonctionnement.

2.5 Prédiction Intra

C'est est une technique de compression vidéo exploitant les corrélations spatiales au sein d'une même image. Elle prédit les valeurs de pixels d'un bloc (PU) à partir des échantillons déjà codés de ses blocs voisins (PUs ou TBs), supposés similaires. Indispensable pour les images clés (tranches I)

et les points d'accès aléatoire, elle garantit une reconstruction autonome sans dépendre d'autres trames.

Dans le HEVC, son processus se décompose en trois étapes : construction des références (à partir d'échantillons décodés), prédiction, et post-traitement (Figure 2.9), avec un équilibre entre complexité et efficacité. Chaque opération s'applique à un bloc PU unique, partitionné selon des règles prédéfinies (section 3.4.3), optimisant ainsi l'adaptation aux structures spatiales locales [24] [25].

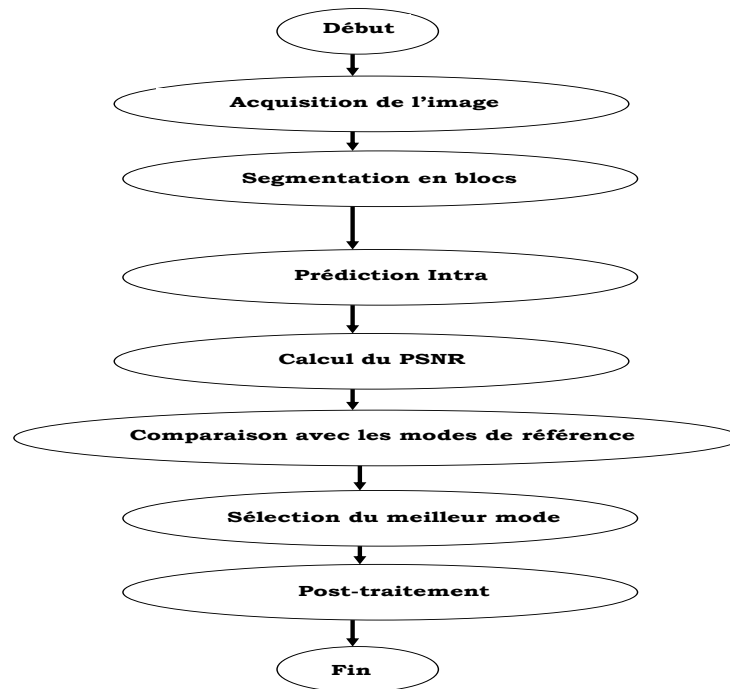


Figure 2.9 Organigramme de la Prédiction Intra dans HEVC

L'intra-prédiction dans HEVC peut être considérée comme une extension de H.264 / AVC vu que les deux sont des prédictions spatiales basées sur l'échantillon [130]. Cependant, l'une des améliorations apportées dans le nouveau standard concerne l'augmentation du nombre de prédicteurs intra mis en concurrence. En effet, le nombre total de la prédiction intra supporté par HEVC est de 35 modes, comme il est listé dans le tableau 2.3, et représenté dans la figure 2.10. Ils sont désormais possibles pour la composante de luminance incluant 33 directions spatiales, un prédicteur DC (moyenne des pixels de référence) et un nouveau prédicteur nommé Planar [133]. Plusieurs améliorations ont été introduites en HEVC dans le module de prédiction intra : En raison de la plus grande taille des images, la plage de tailles de blocs de codage prises en charge a été augmentée.

Tableau 2.3 La relation entre le numéro de mode intra prédiction et son nom associé

Numéro de mode d'Intra prédiction	Le nom associé
0	INTRA_PLANAR
1	INTRA_DC
2 . . . 34	INTRA_ANGULAR[i], i=2 . . . 34

Les méthodes de prédiction peuvent être divisées en deux catégories principales angulaire et non angulaire.

- Les modes angulaires exploitent les informations directionnelles des bords déjà décodés pour prédire le bloc actuel.

- Les modes non angulaires, quant à eux, incluent le mode planaire et le mode DC, qui sont conçus pour estimer des zones d'image lisses [130].

Lors de la prédiction d'un bloc, un seul mode est sélectionné et appliqué à l'ensemble des pixels internes. La prédiction intra HEVC repose sur des directions angulaires adaptatives, où les modes verticaux et horizontaux exploitent respectivement les pixels de référence adjacents (lignes inférieures/supérieures ou colonnes latérales) pour estimer les déplacements. Bien que 35 modes directionnels soient initialement disponibles,

HEVC restreint de manière dynamique la quantité de modes en fonction de la dimension des blocs (PU/CB). Par exemple, les blocs 4×4 et 64×64 utilisent respectivement seulement 33 et 2 modes angulaires, ce qui représente un équilibre entre la qualité prédictive et le coût supplémentaire en termes de calcul. Effectivement, les petits blocs de dimension 4×4 ont besoin de peu de directions supplémentaires, alors que les grands blocs de 64×64, généralement liés à des zones uniformes, nécessitent peu de variations directionnelles. En plus des modes angulaires, HEVC inclut un mode DC (qui calcule la moyenne des pixels de référence) et un mode planaire (qui utilise l'interpolation linéaire) pour les blocs 16×16, ce qui optimise la prédiction dans des textures diversifiées [133] [134].

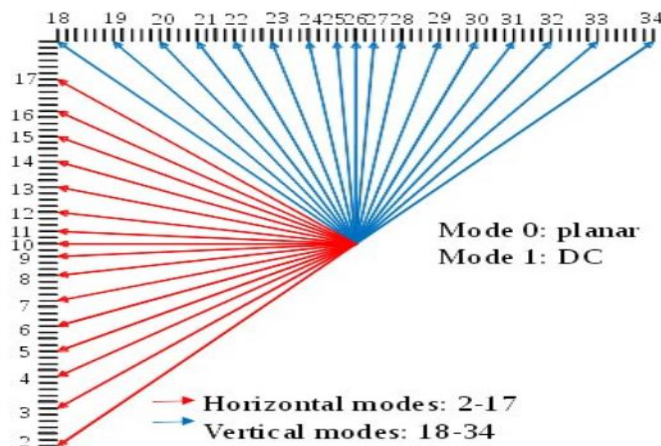


Figure 2.10 Les 33 directions disponibles en prédiction Intra [131]

2.5.1 Génération d'Échantillons de Référence

Tous les modes de prédiction s'appuient sur le même ensemble d'échantillons de référence, dérivés des blocs supérieur (échantillons rouges) et gauche (échantillons bleus) adjacents à l'unité centrale actuelle. Pour les orientations diagonales, on peut aussi se servir de l'échantillon du coin supérieur gauche (rose). En outre, comme l'illustre la figure 2.11, on peut également avoir recours aux échantillons situés en bas à gauche (échantillons orange) et en haut à droite (échantillons verts), à condition qu'ils soient issus des opérations de décodage antérieures. Ainsi, pour prédire le PU actuel de dimension $M \times M$, on peut se baser sur $4M+1$ échantillons voisins spatialement [130]. Dans les parties qui suivent, on désigne les échantillons de référence par $R(x, y)$, en partant du coin supérieur gauche comme point d'origine. Par ailleurs, la valeur de l'échantillon estimée dans l'unité centrale actuelle à la coordonnée (x, y) est désignée par $P(x, y)$. Cette section approfondira les détails du codage intra et des techniques associées.

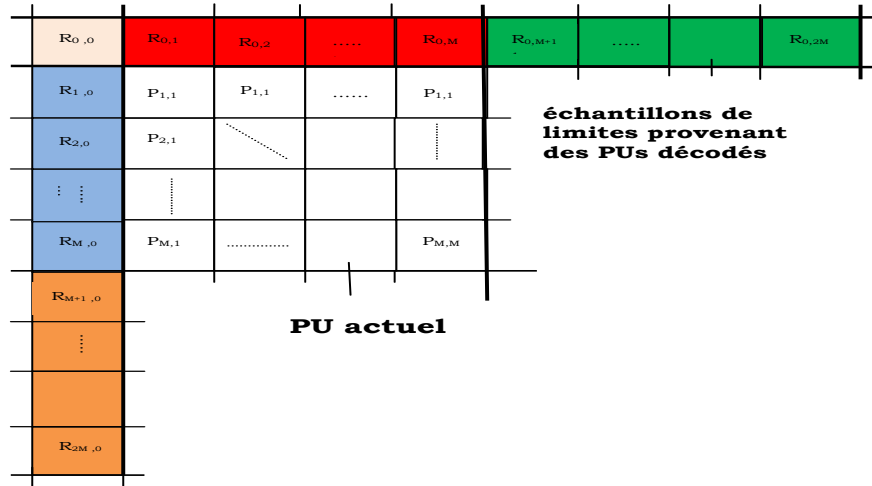


Figure 2.11 Échantillons de référence $R(x, y)$ [132]

2.5.2 Intra Prédiction Angulaire

Le mode angulaire en HEVC fonctionne dans le champ spatial, comme en H.264/MPEG-4 AVC, mais prend en charge 33 orientations directionnelles distinctes, contre seulement huit pour son prédécesseur. Ce nombre résulte d'un compromis visant à optimiser l'efficacité de codage tout en maîtrisant la complexité algorithmique, en particulier pour les contenus vidéo standards [132].

Indexés de 2 à 34, les modes angulaires couvrent des angles allant de la quasi-horizontale à la quasi-verticale, en passant par la quasi-diagonale, comme illustré par la figure 2.8. Chaque quadrant divisé en 1/8 contient huit directions de prédiction et leurs paramètres de déplacement d (exprimé en fractions de précision de 1/32 pixel) associés sont [2, 5, 9, 13, 17, 21, 26, 32]. L'interprétation physique de ces paramètres de déplacement est la tangente de l'angle prévu, soit [2/32, 5/32, 9/32, 13/32, 17/32, 21/32, 26/32, 32/32]. Pour illustrer cela, le paramètre « 32/32 » correspond à une direction de prédiction de 45° (où la valeur tangentielle est 1). Les directions horizontale et verticale sont notées respectivement H et V [132]. Les modes 10 et 26 correspondent à la prédiction horizontale pure et à la prédiction verticale pure. En s'orientant vers les directions diagonales, le paramètre de déplacement augmente afin de diminuer la concentration des modes de prédiction pour les directions moins courantes. Pour les modes qui sont presque horizontaux et verticaux, le mouvement devient réduit afin d'offrir une prédiction plus exacte pour ces types de directions.

Pour déterminer la valeur de chaque échantillon du PB, l'extrapolation des échantillons se fait sur la base des échantillons de référence, en tenant compte de l'orientation directionnelle pour simplifier la complexité. Suite à la projection du pixel prédit sur le réseau d'échantillons de référence selon la direction sélectionnée, la valeur prédite peut être déterminée en effectuant une combinaison entre la valeur projetée et son échantillon voisin le plus proche sur le côté droit. Ce processus peut être décrit comme :

Pour les modes de prédiction angulaire égaux ou supérieurs à 18 (modes verticaux), les échantillons de prédiction peuvent être décrits par les équations suivantes : [133].

$$P_{x,y} = ((32 - w_y) \cdot R_{0,i} + w_y \cdot R_{0,i+1} + 16 \gg 5) \quad (2.4)$$

$$w_y = (y \cdot d) \& 31 \quad (2.5)$$

$$i = x + C_y \quad (2.6)$$

$$C_y = (y \cdot d) \gg 5 \quad (2.7)$$

Pour les modes de prédiction 2 à 17, les valeurs prédites peuvent être obtenues en échangeant les coordonnées x et y dans les équations (2.4) et (2.5).

$$P_{x,y} = ((32 - w_x) \cdot R_{i,0} + w_x \cdot R_{i+1,0} + 16 \gg 5) \quad (2.8)$$

$$w_x = (x \cdot d) \& 31 \quad (2.9)$$

$$i = y + C_x \quad (2.10)$$

$$C_x = (x \cdot d) \gg 5 \quad (2.11)$$

Où : $P_{x,y}$ est la valeur prédite dans la position (x, y) .

w_x ou w_y est un paramètre de pondération entre deux échantillons de référence $R_{0,i}$ et $R_{0,i+1}$ ou $R_{i,0}$ et $R_{i+1,0}$, respectivement.

- \gg représente une opération de décalage de bits vers la droite.
- $\&$ l'opération logique ET.
- i L'indice d'échantillon de référence
- d le déplacement de projection correspondant à la direction de prédiction sélectionnée [133], ayant une valeur de -32 à 32.

Le paramètre w_y et C_y ou w_x et C_x ne dépendront que de la coordonnée y ou x , donc ces deux paramètres resteront constants lorsque les échantillons de prédiction sont étant calculé pour la même ligne.

2.5.3 Intra prédiction plane (Planar)

HEVC comprend également un mode Planar, similaire au mode planaire en H. 264/MPEG-4 AVC, et est connu sous le nom de mode 0. Il est utile pour prédire les régions d'image lisses Inversement, à son précédent qui est utilisé pour les images texturées et peut introduire des discontinuités le long des limites des blocs. Il peut être décrit comme la moyenne des deux prédictions linéaires, la figure 2.12 est un exemple de ce mode dont la partie (a) désigne les échantillons de référence employés pour la prédiction du pixel P [1] [2] lorsque le bloc est de taille 4×4 et (b) illustre le résultat du calcul.

La valeur de chaque échantillon du PB est calculée en supposant une surface d'amplitude avec un gradient lisse horizontal et vertical dérivé des échantillons limites des blocs voisins [132]. HEVC prend en charge toutes les tailles de bloc pour ce mode. Les valeurs de la prédiction sont calculées par l'équation suivante:

$$P_{x,y}^v = (S - y) \cdot R_{0,x} + i \cdot R_{N,0} \quad (2.12)$$

$$P_{x,y}^h = (S - x) \cdot R_{y,0} + j \cdot R_{0,N} \quad (2.13)$$

$$P_{x,y} = (P_{x,y}^v + P_{x,y}^h + S) \gg (\log_2(S) + 1) \quad (2.14)$$

Où $P_{x,y}^h$ est la valeur prédite dans les coordonnées (x, y) , S désigne la taille de l'unité de prédiction, $x, y = 0 \dots S - 1$ détermine la position dans la prévision bloc, et R indique le tableau d'échantillons de référence voisin.

Ce mode de prédiction est un bon choix, lorsque le contenu de l'image ne correspond pas à un modèle de bord. Grâce à une variation graduelle des valeurs de prédiction, il ne crée aucune discontinuité

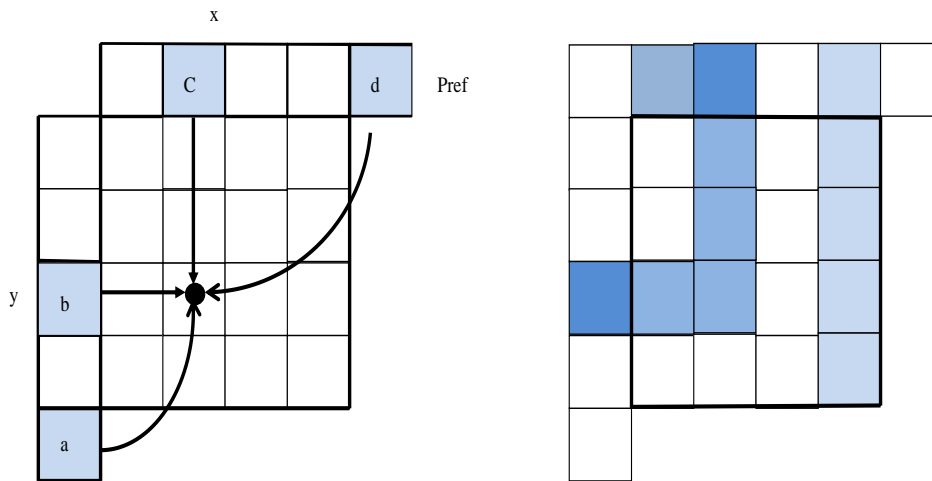


Figure 2.12 Intra prédiction plane 4×4 [130]

2.5.4 DC Intra prédiction

Ce mode opère de façon comparable au mode DC dans la norme H.264/MPEG-4 AVC, et il est identifié sous le nom de mode 1. Il convient particulièrement bien à la prévision des zones d'image ayant des variations uniformes et progressives. Cependant, il propose une estimation moins précise pour les zones comportant des détails de haute fréquence, ce qui le rend moins performant pour les textures délicates. La moyenne des échantillons de référence est utilisée pour déterminer chaque échantillon du bloc prédit (PB). Comme indiqué précédemment, ces références se réfèrent aux échantillons qui se trouvent sur les bords des blocs adjacents, en haut et à gauche. Ainsi, chaque échantillon du PB reçoit une valeur identique [134].

La formule générale pour calculer la valeur prédite d'un échantillon dans un bloc de taille $N \times N$ Pixels, est calculée par la formule suivante [133] :

$$DC_{Pred} = \frac{1}{2N} (\sum_N R_{0,x} + \sum_N R_{y,0}) \quad (2.15)$$

2.5.5 Importance du lissage des limites dans le post-traitement du HEVC

Comme indiqué dans la section 2.5, une étape de post-traitement est nécessaire pour optimiser la qualité des images reconstruites. Dans la norme HEVC, l'adoucissement des contours est crucial pour minimiser les discontinuités aux bords des unités de prédiction (PU). Cette procédure met en œuvre des filtres spécifiques appliqués sur les échantillons de référence pour rehausser la qualité visuelle et maximiser l'efficacité du codage. HEVC comprend un filtre de lissage qui agit principalement pour les modes de prédiction DC, vertical pur et horizontal pur. Cette filtration s'applique à la première ligne et la première colonne des blocs en vue de réduire les artefacts engendrés par le transfert direct des valeurs de pixels.

Le filtre de lissage est composé d'un filtre à réponse impulsionnelle finie à deux coefficients pour la prédiction DC ou d'un filtre de lissage basé sur le gradient pour les prédictions horizontale et verticale. Étant donné que les composantes chroma sont généralement déjà lisses, ce filtre n'est pas appliqué dans ce cas. Le lissage des limites de prédiction concerne uniquement la composante luma. Il est appliqué aux échantillons de référence en fonction de la taille des blocs et de l'orientation de la prédiction.

Conformément à la norme de compression HEVC, la prédiction est généralement réalisée sur des blocs de tailles variées pour les CTB B et P, puis suivie d'une transformation [124].

2.5.6 Description de la Décision en mode de Prédiction Intra dans HEVC

Il convient de noter qu'en compression vidéo, le choix du mode et des paramètres de prédiction pour chaque bloc est fait au niveau du codage. L'Optimisation Taux-Distorsion (OTD) est une combinaison du flux binaire utilisé et la distorsion observée, basée sur la sélection du mode et des paramètres de prédiction.

Lors de ce processus, en fonction de la ressemblance entre le Macrobloc original et le Macrobloc prédit, le mode de prédiction fournissant l'erreur résiduelle la plus faible est sélectionné. Cette erreur résiduelle est calculée à l'aide d'un critère de comparaison qui représente une mesure objective de la ressemblance entre les deux Macroblocs (original et prédit) [134].

Ces divers facteurs, permettent d'évaluer la distorsion issue du traitement d'une image ou d'une vidéo, parmi lesquels on retrouve les plus couramment utilisés : La MAD (Mean of Absolute Difference), la MSE (Mean Squared Error), le PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio), la SAD (Sum of Absolute Differences), la SATD (Sum of Absolute Transform Differences), La SSD (Sum of Square Differences).

Chaque critère sert à un usage particulier. Le PSNR et le SSIM évaluent la déformation et les modifications structurelles entre deux images. La MAD, la SAD et la SATD affinent l'estimation du mouvement en optimisant le critère débit-distorsion. Le SSD mesure la déformation entre le bloc initial et le bloc reconstruit lors de l'optimisation par OTD. D'autres paramètres, tels que (MSE), évaluent la précision entre deux signaux.

Parmi ces techniques et pour mesurer la corrélation entre deux Macro blocs de taille $N \times N$, le Rapport Signal sur bruit de crête, également appelé PSNR est utilisé. Il est dérivé de l'Erreur quadratique moyenne (MSE). Elle représente l'énergie moyenne de la différence entre l'image réelle et l'image dégradée. Son expression est fournie dans l'équation 2.16 et 2.17.

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [I(i, j) - K(i, j)]^2 \quad (2.16)$$

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{\text{MaxValue}^2}{MSE} = 10 \log_{10} \frac{(2^{\text{BitDepth}-1})^2}{MSE} \quad (2.17)$$

Où I , K , m , n , (BitDepth) symbolisent respectivement l'image réelle, l'image dégradée, la largeur de l'image, la hauteur de l'image et La profondeur de bits qui désigne le nombre de bits utilisés pour stocker chaque valeur de pixel. Lorsque cette profondeur est égale à 8, la valeur maximale serait de 255.

Puisque le PSNR est l'expression logarithmique de MSE, donc l'unité de base est dB. Une valeur PSNR plus élevée indique une distorsion d'image plus faible. Typiquement, ces valeurs en compression d'image vont de 30 à 40 dB, plus elles sont élevées, c'est mieux.

Le processus complet de l'intra-prédiction pour HEVC peut être résumé dans un organigramme qui représente une brève description de la façon dont la décision du mode de prédiction Intra est organisée (figure 2.13), en mettant l'accent sur les fonctions responsables du calcul de la prédiction Intra PU et du calcul du paramètre objectif pour chaque direction de prédiction Intra. Ces fonctionnalités sont effectuées à travers un traitement successif et le but de cette recherche est de rendre ces calculs comparables.

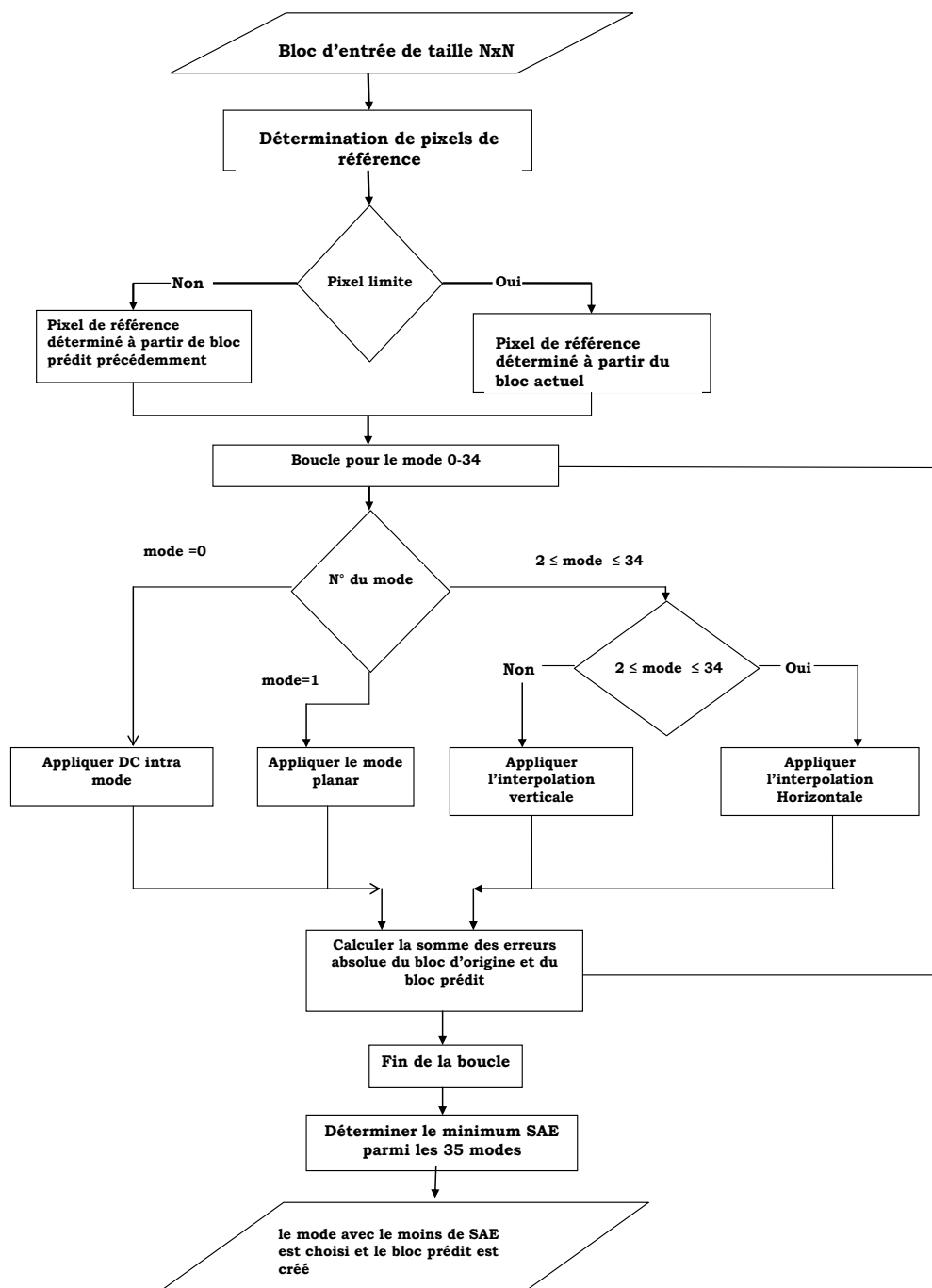


Figure 2.13 Schéma complet de l'intra prédiction dans HEVC [...]

2.6 Techniques de prédictions intra dans les encodeurs vidéos

Le standard (HEVC) utilise diverses techniques pour améliorer l'efficacité de la compression vidéo et l'intra-prédiction est une technique clé exploitant les corrélations spatiales en prédisant les parties successives d'une image à partir de parties déjà encodées. L'intra codage HEVC est basé sur la prédiction d'échantillons spatiaux et peut être décrit comme une collection de nombreux éléments, notamment le partitionnement de l'arbre quadruple, 35 modes d'intra prédiction, le lissage de l'échantillon de référence, le processus de filtrage de l'échantillon limite et le codage intra mode. Un aperçu des principales techniques utilisées :

- a. **Techniques Approximatives** : elles utilisent des pixels voisins plus proches pour réduire la taille du matériel de prédiction intra, avec un impact minimal sur la qualité.

- b. Structures de Tampon et Ordres de Balayage** : Une architecture matérielle entièrement pipeline utilise une structure de tampon innovante pour les échantillons de référence et un ordre de balayage dépendant du mode pour améliorer l'efficacité de l'intra-prédiction.
- c. Filtrage des Frontières de Prédiction** : Un filtrage amélioré des frontières de prédiction est proposé pour réduire les distorsions aux frontières des blocs de prédiction.
- d. Ordre de Codage Adaptatif**: est proposé pour les blocs et sous-blocs afin de minimiser le coût de codage et réduire le débit binaire.
- e. Réduction de la Complexité de Calcul** : Des techniques sont proposées pour réduire la complexité de calcul et la consommation d'énergie des modes de prédiction angulaire.
- f. Prédiction Basée sur les Réseaux de Neurones Convolutionnels (CNN)** : Des méthodes qui remplacent les modes angulaires traditionnels de HEVC, améliorant la précision de la prédiction et réduisant le débit binaire.

Dans notre travail, nous nous concentrons sur les différentes approches proposées pour améliorer la prédiction intra dans HEVC en réduisant le nombre de modes de prédiction évalués. Plusieurs concepts sont utilisés dans la littérature pour atteindre cet objectif, notamment l'analyse de la directionnalité des textures, l'exploitation de la similarité structurelle, l'étude de la complexité des textures, ainsi que l'application de méthodes d'apprentissage automatique et de réseaux neuronaux convolutifs (CNN). Des approches basées sur l'apprentissage profond sont également explorées pour optimiser la sélection du mode de prédiction.

2. 7 Importance de la Compression Vidéo pour optimiser la bande passante internet

Le multimédia, particulièrement l'image et la vidéo, évolue rapidement et influence divers secteurs tels que la médecine et la surveillance. Néanmoins, l'augmentation du volume des données engendre une complexité accrue de traitement et un allongement des temps de transmission, rendant la compression indispensable. Cette technique aide à minimiser la taille des fichiers, à améliorer l'exploitation des canaux de communication et à réduire la largeur de bande passante requise.

Sans compression, le volume de données pour le stockage et la transmission des vidéos serait extrêmement élevé, rendant leur gestion complexe et coûteuse. Par exemple, une vidéo en 720×480 Pixels à 30 images par seconde avec 24Bits par pixel génère un débit de 249Mbps et nécessite 19 Go pour 10 minutes de stockage. Pour une vidéo en $1080p$, ce débit atteint 1,5Gbps, et 10 minutes de stockage requièrent 112 Go, ce qui rend son transfert difficile.

Une simple estimation montre l'importance de la compression. Il devient possible de réduire cette bande passante, facilitant la transmission et permettant la diffusion simultanée de plusieurs flux sur un même réseau. La recherche examine la qualité des vidéos avant et après leur passage par l'encodeur HEVC.

L'équation (2.18) montre la largeur de bande (LB) requise pour transmettre une séquence vidéo non compressée, en considérant un sous-échantillonnage de pixels 4: 2: 0. La bande passante est le débit du canal de communication, qui existe entre la mémoire et les unités de traitement.

$$LB = L \times A \times QPS \times B \times tx_sub \quad [\text{bits/s}] \quad (2.18)$$

Dans cette équation, $L \times A$ désigne le nombre d'échantillons au sein d'une trame, avec L symbolisant la direction horizontale et A la direction verticale; QPS correspond au nombre d'images par seconde de la séquence vidéo; B indique le nombre de bits par échantillon de luminance ou de chrominance (généralement 8 bits); tx_sub définit le coefficient de multiplication pour le sous-échantillonnage des pixels, où $tx_sub = 1,5$ pour le sous-échantillonnage 4: 2: 0 signifiant qu'il y a deux échantillons de chrominance pour chaque échantillon de luminance lors du traitement de quatre échantillons de luminance [135].

2.7.1 Relation entre le module d'intra prédiction du HEVC et la bande passante internet

Elle s'appuie essentiellement sur la performance de compression fournie par ce module, qui a un impact direct sur le flux de données nécessaire pour diffuser la vidéo. On peut citer les points essentiels :

1 Compression spatiale et diminution du débit binaire : L'outil d'intra-prédiction du HEVC supprime la redondance spatiale dans une image (trame) en anticipant les blocs de pixels à partir des échantillons adjacents déjà codés. Il repose sur une variété de modes, y compris les modes angulaires, planaire et CONTINU, pour gérer efficacement différents types de contenu d'image [136]. Cela diminue le volume de données à coder et à transférer. Cette prédiction est essentielle pour gérer la bande passante en minimisant les accès à la mémoire, diminution du bitrate (débit binaire) de la vidéo et en améliorant son envoi. L'optimisation de cette prédiction joue un rôle clé dans l'amélioration de la transmission des vidéos hautes résolutions, comme la 4K. Toutefois, l'emploi de méthodes telles que la copie intra-bloc (IBC) dans l'encodage du contenu d'écran (SCC) peut provoquer une hausse considérable de la demande en bande passante (DRAM), du fait des accès récurrents à la mémoire de référence. Afin de minimiser cet effet, une méthode de recompression sans perte a été suggérée, ce qui conduit à une réduction de 72% de la taille des blocs de référence conservés en mémoire avec un débit moindre sans perte de qualité perceptible [137].

2 Fréquence des trames intra (I-frames) : Les trames intra (I-frames), générées par le module d'intra prédiction, sont essentielles pour la synchronisation et la résilience aux erreurs dans un flux vidéo. Cependant, elles sont moins compressées que les trames inter (P/B-frames), car elles ne dépendent pas de trames précédentes. Plus le GOP (Groupe d'Images) est court (nombreuses I-frames), plus le débit global augmente, nécessitant une bande passante internet plus élevée. Les HEVC ajustent dynamiquement l'usage de l'intra prédiction en fonction des conditions réseau : En cas de bande passante limitée, l'encodeur peut optimiser le compromis entre qualité et débit en réduisant la complexité des prédictions intra ou en allongeant le GOP. À l'inverse, pour des applications nécessitant une faible latence (streaming en direct), des I-frames plus fréquentes sont utilisées, augmentant temporairement le débit.

A savoir, que L'intra prédiction du HEVC fonctionne avec d'autres mécanismes (transformations entières, codage entropique CABAC) pour maximiser la compression.

Ce qui permet Une réduction globale du bitrate de 30 à 50 % par rapport au H.264 pour une qualité équivalente, permettant une transmission vidéo sur des réseaux à bande passante modérée (streaming 4K sur fibre ou 5G).

2.7.2 Le rôle du HEVC dans l'optimisation de la bande passante

Comme cela a été discuté dans cette section, la conception d'un encodeur vidéo doit chercher à réduire les accès à la mémoire externe, à respecter les restrictions de bande passante disponibles pour la communication avec la mémoire et à réduire la consommation d'énergie générée par ces accès et le trafic de données. Cependant, il existe des travaux dans la littérature qui proposent des stratégies pour optimiser la bande passante utilisée pour les encodeurs vidéo. Ainsi, Les contributions à cette thèse consistent principalement en des améliorations du bloc de prédiction Intra-Image, dans le but de réduire drastiquement la complexité de calcul et en même temps, d'atteindre une efficacité de compression comparable au HEVC conventionnel. En moyenne, certaines opérations de codage peuvent être évitées en utilisant l'approche proposée au prix de pertes d'efficacité de compression relativement faibles.

Nous présentons un algorithme d'implémentation matérielle axé sur le partitionnement des unités de codage (CU) et la sélection du mode de prédiction. Pour le partitionnement de la taille de l'UC, nous introduisons un algorithme adaptatif basé sur la complexité de la texture de l'image, ce qui permet

de filtrer efficacement les blocs de codage inutiles. En outre, nous optimisons le choix des modes de prédiction intra en réduisant les candidats redondants selon la direction de texture de chaque unité de prédiction. Cette approche permet de minimiser la complexité de calcul durant le processus de codage.

2. 8 Conclusion

A l'issue de cette étude détaillée de la norme HEVC en mode intra, il ressort que l'optimisation des modules clés, tels que la prédiction intra, est déterminante pour concilier efficacité de compression et contraintes temps réel. Les choix d'implémentation matérielle ou logicielle de ces modules doivent être guidés par leurs exigences computationnelles, notamment pour traiter des résolutions élevées à des fréquences accrues. La prédiction intra, en particulier, se révèle un levier essentiel pour réduire la bande passante nécessaire au transport vidéo, à condition d'adapter dynamiquement les configurations d'encodage. Ce chapitre a présenté une explication exhaustive de ce module. Dans ce qui suit, nous allons présenter la méthode de conception et développement d'une prédiction intra amélioré pour l'analyse de la vidéo Compressée avec HEVC d'une transmission Par Liaison Optique.

Chapitre 3 : Evaluation des paramètres des systèmes de transmissions optiques implémentés pour des flux vidéo

3.1 Introduction

La transmission vidéo à haute efficacité grâce à la technologie de la fibre optique a révolutionné la façon dont le contenu vidéo de haute qualité est livré et consommé, en particulier en période de demande croissante de bande passante et d'efficacité.

La capacité du HEVC à préserver une qualité vidéo élevée tout en réduisant la consommation des ressources réseau fait de cette technologie un outil indispensable pour les applications multimédias actuelles, en particulier dans les situations à bande passante limitée. En outre, la capacité élevée de transmission de données de la fibre optique, combinée à sa résistance aux interférences électromagnétiques, optimise l'efficacité globale des systèmes de diffusion vidéo et pave le chemin vers une expérience utilisateur améliorée.

Les chapitres précédents ont fait l'objectif des travaux qui s'articulent autour de l'optimisation de la bande passante à travers plusieurs axes complémentaires.

Nous avons d'abord étudié le module d'intra-prédiction du standard HEVC, en mettant en avant son impact sur la compression vidéo et la réduction du débit binaire. Cette analyse a permis de mieux comprendre les mécanismes de prédiction spatiale utilisés pour minimiser la redondance des données. Ensuite, nous avons exploré l'utilisation du multiplexage optique OTDM combiné à la modulation DPSK dans un système de transmission sur fibre optique. Cette approche vise à accroître significativement le débit global du canal tout en assurant une meilleure robustesse face aux perturbations optiques.

Pour valider ces contributions, des environnements de simulation ont été mobilisés :

- **Matlab** pour modéliser les algorithmes de traitement numérique et analyser les performances du module HEVC
- **OptiSystem** pour simuler les performances physiques du système optique OTDM-DPSK
- **FFMPEG** pour la compression, la conversion et l'évaluation des flux vidéo encodés avec HEVC

La complémentarité entre ces approches permet de proposer une chaîne de transmission optimisée, allant de la compression vidéo jusqu'à la transmission optique haute capacité. Nous mettons en évidence le lien direct entre les choix d'algorithmes de codage et les performances physiques du canal, en ciblant un objectif commun : améliorer l'utilisation de la bande passante tout en garantissant la qualité du signal transmis.

Dans ce chapitre, nous résumons les contributions principales, discutons les limites rencontrées, et proposons des pistes concrètes pour une implémentation matérielle future de la chaîne complète.

3.2 Optimisation du codage de la source en utilisant différents niveaux et paramètres de l'encodeur HEVC

L'évolution La norme HEVC se compose de plusieurs blocs (Figure 3.1). En-effet, la vidéo numérique se caractérise et se distingue principalement par sa résolution spatiale (ou intra-image) et sa résolution temporelle (ou inter-image) [138]. La prédiction spatio-temporelle est

un mécanisme largement utilisé, tant dans le codage statique des images (comme la norme JPEG) que dans le codage vidéo (comme MPEG-2 et MPEG-4). Son rôle principal est de réduire une grande partie de la redondance des données en codant uniquement les différences entre les zones proches [139]. Au cours de ces étapes de traitement, différents facteurs affectent la qualité de l'expérience et la qualité du service [140]. L'efficacité du codeur dépend de sa capacité à réduire la longueur de code de l'image résiduelle, qui est la différence entre l'image prédite et l'image originale [141].

De nombreux secteurs exigent de plus en plus une qualité vidéo et une efficacité de codage supérieures. Par conséquent, l'émergence du codage H. 265/HEVC en temps réel visait à offrir des améliorations significatives en termes de compression et de performances par rapport aux normes précédentes [142]. Certains chercheurs ont proposé des méthodes basées sur l'analyse de gradient pour réduire le nombre de modes de prédiction candidats, réduisant ainsi le temps de codage tout en maintenant une efficacité de codage élevée [143-144]. D'autres ont suggéré d'utiliser des informations liées à la périphérie pour réduire la complexité de calcul en diminuant les modèles de prédiction non pertinents [145-146]. De plus, l'amélioration de la qualité visuelle des vidéos codées intra-image et inter-image a été proposée en améliorant les chemins sélectifs dans l'arbre de codage HEVC et en appliquant des techniques de filtrage adaptatif à chaque chemin sélectionné pour améliorer sa qualité [147].

Il est à noter que dans la plupart des travaux cités ci-dessus, différentes approches, méthodes et techniques sont utilisées en fonction de l'application souhaitée. Ils sont conçues soit sur le partitionnement d'unités, soit sur la réduction du mode de prédiction, soit avec de faibles résolutions qui permettent de réduire la complexité de calcul, donc de gagner du temps de codage et de minimiser la dégradation de la qualité vidéo pour différentes résolutions.

Par conséquent, à cette fin, il est essentiel de comprendre que la prédiction intra doit être au centre de la recherche, où l'accent doit être mis sur l'exécution de la prédiction intra_trame sur différents modes de sélection. Ces questions sont abordées dans le travail proposé.

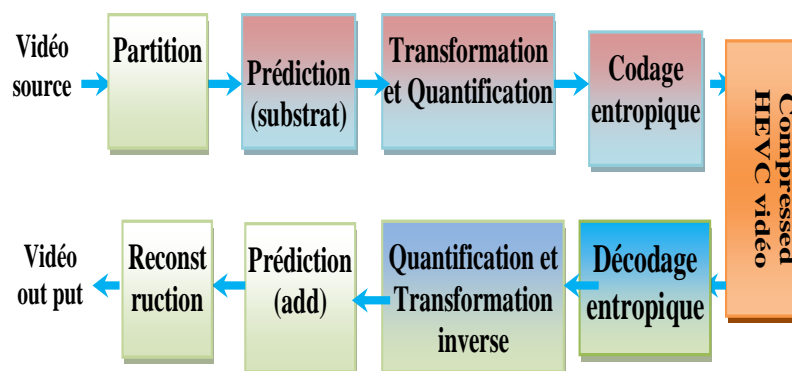


Figure 3.1 Schéma bloc du codec hybride H.265/HEVC

3.3 L'approche proposée

Dans cette partie du présent travail, on s'intéresse au cas des encodeurs vidéo en mode Intra. Ce dernier permet à l'encodeur vidéo de compresser chaque trame indépendamment des autres trames sans aucune prédiction temporelle tout en recherchant le mode optimal, c'est-à-dire en recherchant la direction avec le plus petit changement de bloc. Les principales contributions de l'étude actuelle sont les suivantes:

- l'utilisation de séquences vidéo aux propriétés différentes pour permettre d'exploiter les informations spatiales et temporelles contenues dans les ensembles successifs d'images pour obtenir les meilleures performances de compression et de qualité visuelle.
- Utiliser des vidéos à haute résolution qui fournissent des détails plus significatifs. À partir desquels ils identifient des caractéristiques descriptives peu ou pas du tout invariantes pour permettre le bon choix du mode de prédiction.
- Utilisation de séquences vidéo au format YUV car cet espace colorimétrique permet de traiter différemment la composante de luminance Y et les composantes chromatiques U, V et d'exploiter la faible sensibilité du système visuel humain aux informations de couleur tout en économisant la bande passante.

Donc la méthode proposée c'est une Décision rapide de prédiction intra basée sur l'analyse de complexité de texture et detection de contour .Son Objectif est de réduire le temps de codage intra sans sacrifier significativement la qualité de l'image.

3. 3.1 Mise en œuvre de la décision étape 1

Par rapport à la vidéo HD, la vidéo UHD, FullHD (1920×1080) ou 4K (3840×2160) présente de nombreux avantages. Ils peuvent mieux restaurer la situation réelle de l'image et fournir au public plus de détails de texture, de grands angles visuels et des couleurs modifiables, afin que le public puisse vivre une expérience plus immersive [148] .

Les informations de texture dans le bloc sont décalées vers le domaine fréquentiel et la direction de la texture dans le bloc courant est prédite à l'avance.

En HEVC, différentes tailles de PU ont leurs propres caractéristiques et, après le fractionnement, ces vidéos sont toujours séparées en de nombreuses unités de codage de grande taille, qui ont une texture simple.

Pour améliorer l'efficacité de l'intra-codage, HEVC utilise une structure flexible d'unités de codage comme des unités de prédiction (PU) [148] définies avec des tailles variant de 4×4 à 64×64 et de nombreux modes de prédiction.

L'algorithme d'intra-prédiction HEVC prédit les pixels dans les blocs de prédiction (PBs) d'un bloc de codage (CB), en utilisant les pixels reconstruits dans les PBs voisins disponibles [149]. Il existe 33 modes de prédiction angulaire dans le cas de blocs de prédiction de taille 4×4, 8×8, 16×16 et 32×32, et 2 modes de prédiction angulaire dans le cas de blocs de prédiction de taille 64×64. En outre, il existe un mode DC pour toutes les tailles de blocs de prédiction. Le mode de prédiction planaire est également défini dans le cas de la taille de bloc 16×16 [150].

Au début du processus de décision intra, on ajoute l'étape de calcul de complexité et on adapte dynamiquement les modes de prédiction et les stratégies de partitionnement en fonction de la classification. Les étapes de la méthode se déroulent comme suit :

a. Calcul rapide de la complexité locale

Pour chaque unité de codage (CU), extraire une mesure simple de la complexité de texture en utilisant la variance locale des pixels dans la CU comme indicateur. Plus la variance est faible, plus la région est lisse; plus elle est élevée, plus la région est texturée d'après [151]

Formule utilisée:

$$\text{variance} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2 \quad (3.1)$$

avec :N : le nombre de pixels dans la CU ; P_i : l'intensité du pixel i ; \bar{P} la moyenne des intensités dans la CU.

b. Classification de la CU et Décision rapide de modes de prédiction

- Si la variance est inférieure à un seuil T_{low} , classer la CU comme lisse ce qui permet de limiter l'évaluation aux modes prédictifs simples (DC, Planar) et empêcher le partitionnement supplémentaire, Garder la CU entière.
- Si la variance est supérieure à un seuil T_{high} , classer la CU comme texturée et autoriser uniquement l'évaluation des modes directionnels principaux (0° , 45° , 90° , 135°). Autoriser la division en sous-CU plus petites pour capturer la complexité locale.
- Sinon, considérer la CU comme intermédiaire et évaluer un sous-ensemble plus large mais sans tester tous les modes

On utilise cette étape Puisque le calcul de la variance suffit pour séparer efficacement les régions lisses et texturées dans une image.

Etant donné que les opérateurs de gradient :Sobel ou d'autres ,sont utiles pour détecter des contours précis ou mesurer la direction des changements d'intensité. Et puisque notre but est de savoir si une région est simple ou complexe, et aussi de connaître les directions des contours, alors, l'algorithme que nous avons proposé pour la sélection rapide des modes de prédiction intra HEVC utilise pleinement les caractéristiques de texture et se base sur le gradient pour prédire avec précision le mode de prédiction intra du bloc d'image de toute taille.

c. Décision rapide basée sur la magnitude du gradient de Sobel

L'amplitude et la direction du gradient constituent des aspects essentiels dans le domaine de la vision et du traitement d'images. De plus, ces concepts sont appliqués pour extraire des données d'images numériques et facilitent une variété d'applications telles que l'identification d'objets, le fractionnement d'images et la détection des contours. Sur ce principe, on calcule la magnitude du gradient avec Sobel, Puis on utilise la moyenne des valeurs de gradient comme indicateur de complexité. Cela donnerait une méthode plus sensible aux détails fins. La formule de la magnitude du gradient pour un pixel et comme suit :

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (3.2)$$

Où: G_x^2 est le résultat du filtre Sobel horizontal et G_y^2 est le résultat du filtre Sobel vertical

Ensuite, on prend la moyenne de tous les G dans la CU.

$$\text{Moyenne des magnitudes} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N G_i \quad (3.3)$$

```

% Liste des images de la séquence Bosphorus
imageFiles = dir('Bosphorus_frame_*.png');
numImages = length(imageFiles);
% Paramètres du filtre de Sobel
sobel_kernel = 3;
mag_thresh = [30, 100];
for i = 1:numImages
    % Lire l'image
    img = imread(imageFiles(i).name);
    % Convertir en niveaux de gris si nécessaire
    if size(img, 3) == 3
        gray = rgb2gray(img);
    else
        gray = img;
    end
    % Calculer les gradients en x et y avec le filtre de Sobel
    [Gx, Gy] = imgradientxy(gray, 'sobel');
    % Calculer la magnitude du gradient
    Gmag = sqrt(Gx.^2 + Gy.^2);
    % Normaliser la magnitude à l'échelle [0, 255]
    Gmag = uint8(255 * mat2gray(Gmag));
    % Appliquer un seuillage pour obtenir une image binaire
    binary_output = zeros(size(Gmag));
    binary_output(Gmag >= mag_thresh(1) & Gmag <= mag_thresh(2)) = 1;
    % Sauvegarder l'image binaire résultante
    outputFileName = sprintf('Bosphorus_processed_%04d.png', i);
    imwrite(binary_output, outputFileName);
end

```

Il est pertinent de mesurer l'effet de l'emploi du filtre, appliqué pour identifier les contours et les zones texturées dans les séquences vidéo utilisées, sur la qualité des images. Le PSNR (Rapport de Crête Signal-Bruit) est une mesure fréquemment employée pour juger la qualité d'une image traitée en la confrontant à l'image originale. Un PSNR supérieur suggère une qualité améliorée, signifiant une similitude accrue entre l'image traitée et celle d'origine.

Ainsi, l'évaluation du PSNR offre une mesure objective de la détérioration causée par le traitement appliqué. Il est essentiel de procéder à cette évaluation pour vérifier si le traitement conserve assez les détails importants de l'image ou s'il génère des artefacts non souhaités.

Dans la suite de cette étude, nous allons effectuer le calcul du PSNR pour chaque image des séquences traitées, en les comparant aux images originales associées. Cette étude fournira des données quantitatives concernant l'efficacité du traitement utilisé et contribuera à modifier les paramètres afin d'optimiser la qualité des images résultantes.

3. 4 Méthodologie

Les séquences vidéo utilisées dans l'étude actuelle sont téléchargées de la base de données Ultra Video Group (UVG) [152], créée par un groupe de recherche de l'unité informatique de l'université de Tampere, en Finlande. (UVG) est l'une des bases de données open source contenant des séquences vidéo, mais pas la seule, il y en a beaucoup qui incluent des séquences vidéo avec plusieurs résolutions, FullHD (1920×1080) ou 4K (3840×2160). Les vidéos composant le jeu de données peuvent être classées en deux catégories principales comme suit : Ensembles de données contenant des séquences vidéo à mouvement lent, à texture complexe ou lisse, à faible ou fort contraste, Jeux de données contenant des séquences vidéo à mouvement rapide, à contraste faible ou élevé, et à texture complexe ou lisse. Dans le présent travail, cinq séquences avec une résolution FHD et un format 16:9 avec 30 images par seconde ont été utilisées (le Tableau 3.1 ainsi que la figure 3.2 présentent les séquences utilisées et décrit leurs plans, leurs paramètres essentiels et leurs caractéristiques spécifiques).

Tableau 3.1 Description des séquences vidéo utilisées

Nom	Description
Beauty	Gros plan sur fond noir du visage féminin, cheveux ondulés (a)
Bosphorus	Zoom sur un yacht de luxe, eau ondulante et énorme pont suspendu en arrière-plan (b)
Jockey	Un cheval de course au galop avec un jockey. La caméra suit le cheval, provoquant un arrière-plan en mouvement rapide (c).
ReadySteadyGo	Hippodrome, les cavaliers sont sur le point de s'élancer, les portes s'ouvrent et les chevaux courent vers la gauche, la caméra suit les chevaux en créant des zones d'occlusion ; mouvement latéral (d)
YatchRide	Un gros plan d'un bateau naviguant sur la voie navigable. dont la Caméra est focalisée sur la mousse et l'eau scintillant au soleil ; le bateau quitte la scène à la fin de la séquence (e)

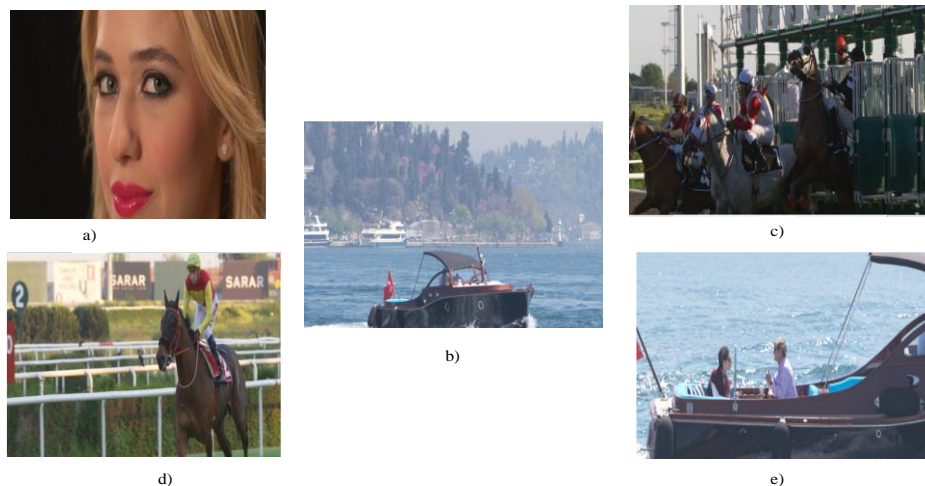


Figure 3.2 Séquences d'entrée utilisées a) Beauty b) Bosphorus c) Jockey d) ReadySteadyGo e) YatchRide

Le travail proposé est réalisé sous un modèle Matlab de prédiction intra pour toutes les tailles de PU et les modes de prédiction. L'entrée est constituée de fichiers vidéo bruts enregistrés au format YUV avec une résolution de 1080p (FHD). Le processus consiste donc à lire une vidéo

couleur RVB et à la convertir au format YCbCr en la sous-échantillonnant (4:4:4 à 4:2:0) pour réduire le nombre de bits. Une fois que les blocs ont été répartis dans la trame, le traitement intra-trame est effectué. Le bloc intra-trame divisé en différentes tailles est traité directement en suivant la procédure habituelle de la voie avant du codeur HEVC et reconstruit le bloc traité qui sert de référence au sous-bloc suivant en utilisant le processus inverse de base dans la voie de reconstruction du codeur HEVC. Appliquer tous les modes de prédiction à chaque sous-bloc, suivi de la quantification et de la transformation et enfin codés à l'aide d'un encodeur de longueur variable adaptatif de contexte (CAVLC) pour obtenir un bit compressé .Au niveau du codeur HEVC, dans le chemin de reconstruction, effectuer un processus inverse pour obtenir une image reconstruite et enfin mesurer une image de qualité. La figure 3.3 montre l'approche d'intra-prédiction proposée. Cet organigramme décrit le fonctionnement du module de prédiction intra dans le HEVC, depuis la lecture de la vidéo YUV jusqu'à la génération des blocs prédits.

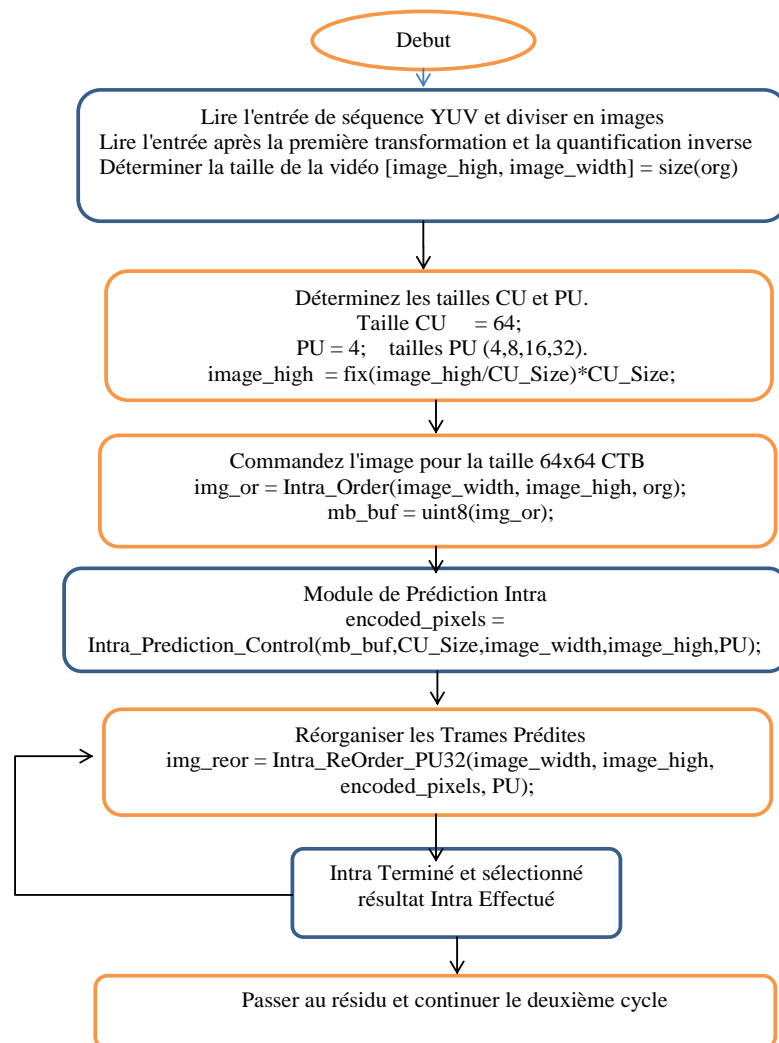


Figure 3. 3 Diagramme de flux de prédiction intra pour toutes les tailles de PU et tous les modes de prédiction.

Le processus se résume en ces étapes : le système commence par lire la séquence vidéo au format YUV qui est appliquée en entrée avec une fréquence de 30 images qui sont ensuite prétraitées et redimensionnées. Les images résultantes sont traitées comme des matrices, elles passent par la transformation et la quantification par différents paramètres .Une fois, la taille de l'image est déterminée (image_high, image_width), elle est divisée en blocs de différentes tailles telles que des matrices 4x4, 8x8, 16x16 et 32x32 qui définissent les unités de codage :

- CU (Coding Unit) = 64
- CTB (Coding Tree Block) = 64
- PU (Prediction Unit) = 4 tailles possibles (64, 48, 16, 32)

Ensuite, on calcule le nombre total de blocs dans l'image selon la taille de l'unité CU. L'image est réorganisée pour adapter les données aux blocs de taille CTB (64x64). Cela permet une structure adaptée au traitement par le module de prédiction cité dans la section précédente qui nécessite la sélection de l'ordre.

Un changement significatif provient de l'introduction de blocs de plus grande taille, où la prédiction intra-image utilisant l'un des 35 modes peut être effectuée pour des blocs de taille allant jusqu'à 32 × 32 échantillons donc c'est une extension des tailles de blocs pour permettre une meilleure adaptation aux zones homogènes et réduire la complexité dans les images peu détaillées. Sachant que HEVC utilise une structure CU/PU basée sur des divisions quad tree ce qui peut être une subdivision plus flexible mais le problème d'optimisation de la complexité pour les petits blocs (4x4) reste, car la prédiction est séquentielle.

Une fois le module de prédiction intra est appelé, le calcul de complexité est introduit, adapter dynamiquement le chemin de décision intra sans toucher aux étapes de codage, de transformée et d'entropie.

Il effectue la prédiction à l'intérieur de l'image (sans dépendre d'images précédentes). Le résultat de la prédiction est stocké dans « encoded_pixels ». Les images prédites sont remises dans leur ordre original à l'aide de la fonction Intra_ReOrder_PU32 ». Cette étape remet les blocs dans la position correcte au sein de l'image. Une fois la prédiction intra terminée, le résultat est transmis à une variable ou un indicateur « IntraPerformed ».

Le système passe ensuite à l'étape suivante du codage vidéo : le traitement du résiduel (différence entre l'original et la prédiction) et un nouveau cycle commence à partir de là.

3.5 Résultats et discussion

3.5.1 Les Mesures de test

Dans cette section, nous évaluons les performances de l'algorithme proposé en termes d'optimisation de la bande passante, de rapport signal sur bruit de crête (PSNR), SNR et de réduction de la complexité. Tous les algorithmes utilisés sont réalisés à l'aide d'un processeur Intel(R) Core(TM) i5-4210M CPU @ 2.60GHz avec 4,00 Go de RAM et Windows 10 Professionnel comme système d'exploitation.

Pour montrer l'efficacité de l'approche proposée, la simulation a été effectuée sur différentes séquences vidéo contenant différentes informations spatiales et temporelles codées. Ces séquences de test ont des propriétés différentes, notamment des résolutions, des scènes et des mouvements différents, comme le montre le tableau 3.1. Les tests effectués ont été réalisés pour comparer différents résultats et déterminer lequel d'entre eux donne les résultats les plus pertinents. La simulation proposée est évaluée par rapport à différentes métriques, à savoir le rapport signal/bruit (PSNR), le SNR et le débit binaire. Comme on peut le voir dans les tableaux récapitulatifs (Tableau 3.2) et (Tableau 3.3) ainsi l'impact du type de séquence sur la qualité vidéo. Les tableaux suivants comparent 35 sorties de mode de prédiction, y compris les modes DC, planaire et 33 directionnel. Le taux de compression de la sortie (Tableau 3. 2) est calculé comme suit:

$$\text{Taux de compression} = \frac{(\text{Taille d'entrée} - \text{Taille compressée})}{\text{Taille d'entrée}} \quad (3.4)$$

Tableau 3.2 Différent Taux de compression pour différentes séquences vidéo

MODE	Beauty 812 KO		Bosphorus 766 KO		Jockey 814 KO		ReadySteadyGo 974 KO		YachtRide 837 KO	
	Compressed size	Compression Ratio	Compressed size	Compression Ratio	Compressed size	Compression Ratio	Compressed size	Compression Ratio	Compressed size	Compression Ratio
DC	253	68.84	814	-----	380	53.31	650	33.26	731	12.66
Planar	766	5.66	74.7	90.24	711	12.65	170	82.54	92.7	88.92
Mode 1	115	85.83	151	80.28	134	83.53	252	74.12	197	76.46
Mode 2	105	87.06	139	94.90	125	84.64	231	76.28	180	78.49
Mode3	98.5	87.86	125	83.68	113	86.11	210	78.43	163	80.52
Mode4	99.8	87.70	123	83.94	111	86.36	204	79.05	159	81.00
Mode5	102	87.43	125	83.68	114	85.99	206	78.85	161	80.76
Mode6	92.6	88.59	110	85.63	102	87.46	179	81.62	140	83.27
Mode7	100	87.68	111	85.50	107	86.85	156	83.98	130	84.46
Mode8	103	87.31	110	85.63	106	86.97	153	84.29	128	84.70
Mode9	106	86.94	110	85.63	107	86.85	152	84.39	127	84.82
Mode10	278	65.76	351	54.17	331	59.33	352	63.86	350	58.18
Mode11	225	72.29	329	57.04	293	64.00	321	67.04	323	61.40
Mode12	489	39.77	870	-----	658	19.16	812	16.63	846	-----
Mode13	319	60.71	605	21.01	434	46.68	563	42.19	591	29.39
Mode14	433	46.67	799	-----	587	27.88	738	24.22	773	7.64
Mode15	265	67.36	535	30.15	349	57.12	505	48.15	515	38.47
Mode16	401	50.61	754	1.56	549	32.55	695	28.64	725	13.38
Mode17	139	82.88	149	80.54	139	82.92	322	66.94	187	77.65
Mode18	400	50.73	752	1.82	548	32.67	698	28.33	725	13.38
Mode19	265	67.36	530	30.80	347	57.37	506	48.04	513	38.70
Mode20	432	46.79	797	-----	587	27.88	736	24.43	771	7.88
Mode21	318	60.83	605	21.01	433	46.80	562	42.29	590	29.51
Mode22	489	39.77	869	-----	658	19.16	808	17.04	845	-----
Mode23	225	72.29	329	57.04	294	63.88	321	67.04	325	61.17
Mode24	277	65.88	351	54.17	331	59.33	352	63.86	349	58.30
Mode25	108	86.69	78.2	89.79	86.8	89.33	159	83.67	88.7	89.40
Mode26	102	87.43	78.6	89.71	84.6	89.60	159	83.67	89.4	89.31
Mode27	97.9	87.94	79.0	89.68	83.1	89.79	160	83.57	90.8	89.15
Mode28	91.5	88.73	70.0	90.86	72.8	91.05	187	80.80	87.3	89.56
Mode29	100	87.68	78.5	89.75	80.9	90.06	216	77.82	97.7	88.32
Mode30	99.1	87.79	74.7	90.24	78.1	90.40	217	77.72	95.2	88.62
Mode31	97.2	88.02	75.9	90.09	77.6	90.46	223	77.10	97.5	88.35
Mode32	100	87.68	84.3	88.99	82.5	89.86	245	74.84	107	87.21
Mode33	110	86.45	87.8	88.53	85.4	89.50	271	72.17	113	86.49
taux de compression moyens	72.54		59.31		64.78		62.74		62.97	
taux de compression moyen global					64.468					

3.5.2 Influence du contenu vidéo

L'évaluation de la complexité texturale de chaque bloc d'image dans la prédiction intra HEVC repose sur l'utilisation conjointe de la variance locale et du gradient de Sobel. Cette approche favorise un choix judicieux des techniques de prédiction, dans le but d'optimiser la performance de la compression sans compromettre la qualité visuelle.

Le tableau 3.2 indique que les méthodes simples, telles que DC et Planar, ont révélé des résultats considérablement divergents. Le mode DC offre des performances assez satisfaisantes sur des séquences faiblement texturées, mais dévoile vite ses limites sur des contenus plus complexes tels que YachtRide, où le taux de compression diminue considérablement. A l'inverse, Planar paraît parfois générer des dimensions excessivement grandes, ce qui laisse penser à une incompatibilité avec la complexité locale, malgré la faible variance observée.

Les modes directionnels (de 1 à 33) offrent généralement des taux de compression supérieurs tout en préservant une valeur PSNR élevée (voir tableau 3.3), ce qui atteste de leur capacité à

représenter correctement les zones riches en contours. Par exemple, les modes 6 à 9 atteignent des taux de compression supérieurs à 85 % dans diverses séquences comme Beauty et Jockey, indiquant une prédiction particulièrement performante de la structure directionnelle.

L'impact du contenu des séquences est également significatif. Beauty et Jockey présentent des motifs texturaux bien structurés, ce qui favorise les modes directionnels détectés grâce aux gradients. En revanche, des séquences comme Bosphorus ou ReadySteadyGo, plus variées en termes de directions et de détails, montrent des résultats plus dispersés. Cela reflète la nécessité d'un critère de décision plus adaptatif ou hiérarchisé.

L'efficacité des méthodes de prédiction est directement affectée par la nature de chaque séquence. Les séquences Beauty et Jockey, caractérisées par leur régularité, favorisent des performances plus uniformes à travers les différents modes. Cependant, les séquences ReadySteadyGo et YachtRide, qui sont plus riches en détails et dynamiques, montrent des différences plus prononcées selon le mode d'utilisation. Cela souligne la nécessité d'une adaptation contextuelle du mode intra en fonction de la complexité locale du contenu.

Les modes 1 à 9 montrent en général un équilibre satisfaisant entre compression et fidélité, avec des taux de compression supérieurs à 80% et des tailles de fichier réduites. Des tailles considérables avec des ratios bas ou parfois inexistantes sont affichées pour certains modes tels que 12, 14, 22. Cela suggère une mauvaise adaptation au contenu ou un échec de prédiction efficace. Les modes 27 à 33, qui se dirigent souvent vers les directions obliques, semblent particulièrement efficaces sur les séquences riches en textures diagonales (Beauty, YachtRide).

L'intégration de la magnitude du gradient et de la variance admet donc la réduction efficace de l'espace de recherche des modes intra, en ôtant ceux qui sont peu susceptibles de correspondre à la structure locale d'un bloc. Les modes sélectionnés sur la base de ces deux mesures ont généré, dans l'ensemble, des valeurs PSNR satisfaisantes tout en diminuant la taille compressée, validant ainsi l'approche proposée.

Tableau 3.3 - Différents taux de PSNR et de SNR

MODE	Beauty 812 KO		Bosphorus 719KO		Jockey 814 KO		ReadySteadyGo 974 KO		YachtRide 837 KO	
	PSNR	SNR	PSNR	SNR	PSNR	SNR	PSNR	SNR	PSNR	SNR
DC	21.467 9	10.016 3	22.275 5	16.613 5	22.105 3	12.610 9	21.984 4	15.842 2	21.8232	17.7266
Planar	21.546 5	11.493 6	22.396 9	18.738 2	22.291 8	14.196 9	21.959 7	17.810 9	21.4909	19.6648
Mode 1	21.542 3	11.451 6	22.407 5	18.732 2	22.264 5	14.119 5	21.924 0	17.798 5	21.5381	19.6897
Mode 2	21.489 1	11.400 7	22.396 3	18.723 0	22.248 5	14.106 2	21.937 1	17.812 7	21.5080	19.6609
Mode3	21.500 0	11.409 0	22.419 7	18.745 6	22.320 3	14.176 2	21.950 6	17.826 7	21.4965	19.6481
Mode4	21.552 6	11.462 3	22.416 4	18.742 8	22.288 3	14.144 9	21.899 0	17.776 9	21.5456	19.6973
Mode5	21.523 7	11.438 4	22.414 1	18.744 3	22.296 1	14.155 7	21.953 6	17.831 4	21.5077	19.6624
Mode6	21.452 3	11.363 8	22.398 9	18.726 0	22.236 5	14.094 6	21.927 4	17.803 4	21.5141	19.6668
Mode7	21.492 4	11.406 1	22.386 9	18.720 3	22.305 8	14.162 9	21.886 2	17.761 2	21.5556	19.7137
Mode8	21.498 3	11.415 5	22.394 7	18.729 9	22.323 5	14.184 8	21.899 9	17.776 5	21.5182	19.6780
Mode9	21.493 8	11.408 4	22.429 0	18.762 8	22.275 7	14.135 4	21.934 6	17.811 3	21.4963	19.6549
Mode10	21.277 8	10.030 5	22.107 2	17.279 0	21.850 1	12.548 4	21.774 8	16.494 8	21.5718	18.5708
Mode11	21.406 9	10.597 6	22.476 6	18.090 6	22.119 4	13.257 0	22.000 2	17.158 4	21.8722	19.3111
Mode12	21.258 1	10.298 8	21.988 4	17.427 5	21.840 8	12.836 6	21.640 0	16.618 6	21.4094	18.6632

Mode13	21.468 0	11.036 6	22.399 4	18.386 8	22.220 1	13.735 6	21.988 2	17.506 6	21.6606	19.4661
Mode14	21.383 8	11.031 3	22.283 2	18.327 5	22.155 2	13.753 5	21.859 7	17.441 6	21.6433	19.1768
Mode15	21.528 0	11.273 5	22.376 1	18.533 6	22.276 3	13.967 6	21.961 7	17.650 0	21.8163	19.3467
Mode16	21.462 1	11.128 2	22.307 1	18.367 0	22.196 4	13.812 0	21.923 0	17.515 0	21.7197	19.1725
Mode17	21.504 2	11.437 8	22.440 1	18.750 0	22.303 5	14.172 0	21.930 5	17.793 7	21.5034	19.6519
Mode18	21.415 6	11.091 8	22.341 8	18.390 0	22.143 9	13.767 5	21.865 8	17.446 1	21.5440	19.3820
Mode19	21.482 3	11.240 9	22.417 1	18.555 7	22.213 8	13.917 6	21.927 3	17.605 4	21.7979	19.3258
Mode20	21.409 0	11.070 8	22.308 5	18.333 8	22.153 9	13.764 5	21.865 4	17.430 9	21.6831	19.1204
Mode21	21.539 6	11.126 1	22.455 5	18.421 8	22.266 4	13.796 8	22.038 0	17.535 3	21.8930	19.2311
Mode22	21.285 7	10.343 8	22.012 6	17.428 2	21.852 0	12.860 9	21.657 3	16.614 1	21.6110	18.4915
Mode23	21.404 3	10.613 3	22.498 4	18.089 0	22.134 1	13.286 4	22.001 5	17.121 8	21.8621	19.1873
Mode24	21.235 4	10.007 1	22.112 4	17.260 0	21.902 9	12.615 6	21.769 3	16.449 9	21.5644	18.5010
Mode25	21.521 5	11.452 6	22.395 1	18.705 1	22.246 9	14.121 2	21.929 2	17.777 2	21.4855	19.6438
Mode26	21.514 7	11.448 4	22.378 2	18.689 7	22.254 8	14.131 6	21.893 9	17.740 1	21.4935	19.6532
Mode27	21.540 4	11.470 5	22.374 6	18.684 9	22.303 3	14.176 9	21.976 3	17.817 0	21.4865	19.6447
Mode28	21.490 8	11.420 8	22.394 9	18.699 1	22.296 8	14.170 9	21.936 8	17.769 2	21.4822	19.6354
Mode29	21.556 0	11.489 3	22.425 0	18.732 3	22.261 5	14.138 1	21.890 7	17.723 6	21.4736	19.6292
Mode30	21.484 3	11.414 0	22.401 5	18.705 7	22.299 8	14.173 5	21.920 6	17.751 5	21.5159	19.6690
Mode31	21.559 1	11.488 5	22.457 8	18.761 7	22.270 4	14.144 1	21.907 9	17.739 3	21.5304	19.6830
Mode32	21.530 5	11.462 4	22.415 7	18.721 3	22.287 3	14.163 5	21.936 8	17.769 6	21.5124	19.6658
Mode33	21.523 1	11.452 4	22.412 8	18.716 9	22.325 7	14.199 2	21.954 9	17.793 7	21.5435	19.6950
PSNR moyen	21.466 8	11.134 0	22.357 5	18.401 0	22.203 7	13.817 1	21.908 7	17.475 0	21.4668	11.1340
SNR global moyen	15.2068									
PSNR global moyen	21.9842									

3.5.3 Analyse comparative des modes en fonction du PSNR et du SNR

Le second tableau présente une comparaison des performances des différentes modes de prédiction intra du standard HEVC sur les cinq séquences vidéo, qui se distinguent par leur nature et leur complexité variée. Chaque mode est examinée sur la base du PSNR et du SNR, fournissant une évaluation tant de la qualité de la reconstruction que de la stabilité du signal compressé.

Les données montrent que les modes DC et Planar, souvent utilisés pour les blocs homogènes ou légèrement texturés, révèlent des valeurs PSNR inférieures. Ils demeurent peu efficaces dans les régions où la variation spatiale est importante. Par exemple, le mode DC obtient des PSNR de 21,4679 dB (Beauty) et 21,8232 dB (YachtRide), qui sont clairement inférieurs à ceux obtenus par les modes directionnels les plus performants. Bien que simples, ces modes tendent généralement à donner des résultats moins performants. Ils demeurent pertinents pour des blocs plats ou uniformes, mais s'avèrent inefficaces dans les zones structurées. En comparaison, plusieurs modes directionnels affichent des valeurs élevées de PSNR ou similaires aux meilleurs pour toutes les séquences, et ont souvent l'un des rapports SNR les plus importants. Notamment les modes 3, 7, 8, 9, 27, 29, 31 et 33. On voit que le mode 31 obtient les meilleurs PSNR sur plusieurs séquences, offrant un équilibre remarquable entre la

fidélité visuelle et la résistance au bruit. Il semble être un choix idéal pour une stratégie de prédiction privilégiée.

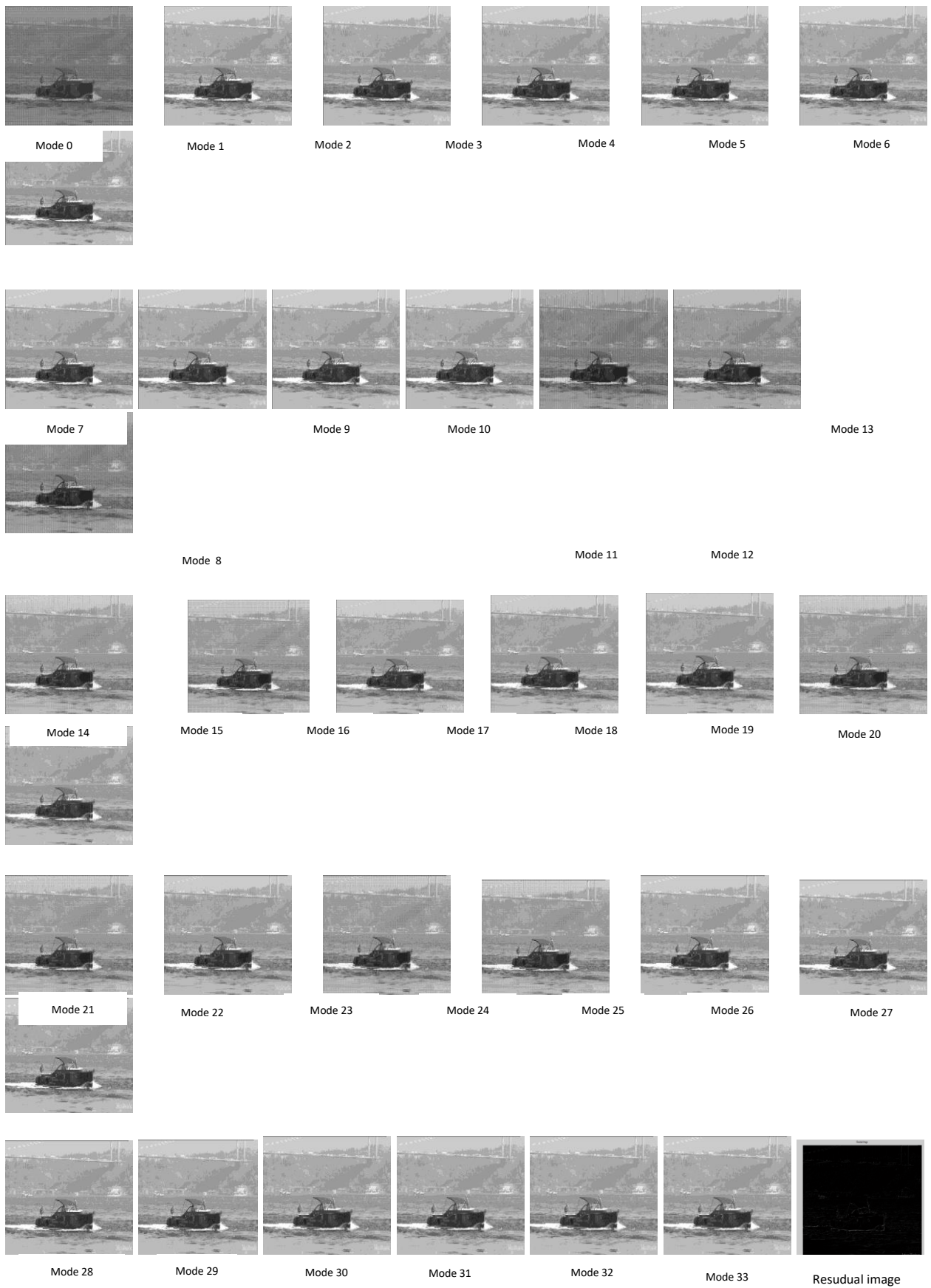




Figure 3.4 Trame de sortie compressée pour différent modes

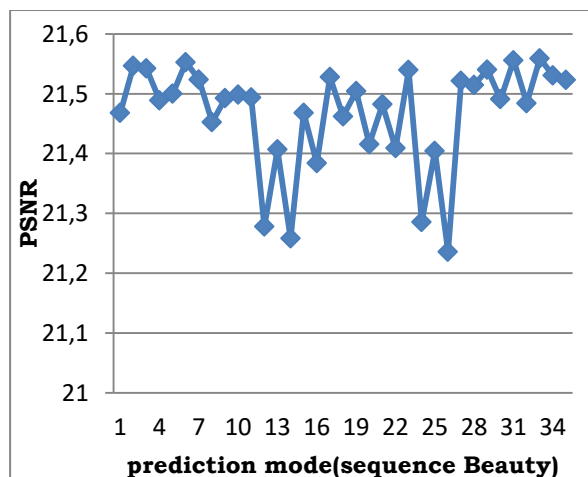
3.5.4 Analyse globale des performances

Des exemples de résultats sont décrits qui exploite le traitement de l'intra prédiction pour évaluer son impact sur les différentes séquences et leurs propriétés comme cité antérieurement.

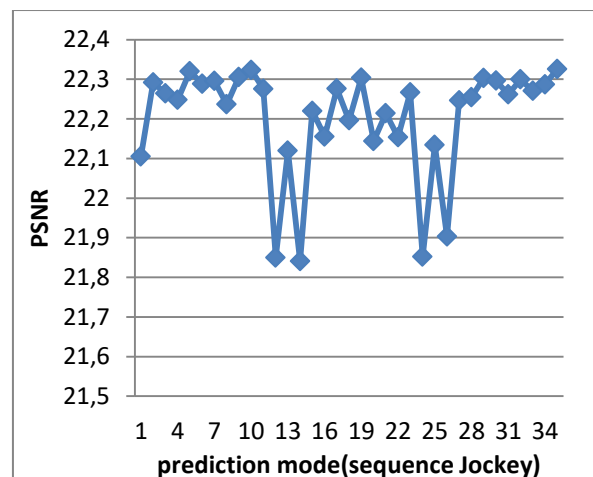
- Dans les séquences statiques telles que la séquence Beauty, le taux de compression moyen est de 72,54, le PSNR est de 21,4668 et le SNR est de 11,1340.
- Dans les séquences où il y a un mouvement rapide sur un fond statique comme Jockey, le taux de compression moyen est de 64,78, le PSNR est de 22,2037 et le SNR est de 13,8171.
- Et pour un mouvement rapide de plusieurs objets sur un fond statique comme ReadySteadyGo, le taux de compression moyen est de 62,74 ; le PSNR est de 21,9087 et le SNR de 17,4750.

Donc, Les prédicteurs résiduels permettent d'améliorer la qualité de l'image en réduisant la quantité d'informations redondantes dans le signal, on peut constater qu'une complexité moindre entraîne une facilité de calcul. De plus, comme [153] l'a mentionné, il a été confirmé que la transmission vidéo HD/UHD nécessite plus de capacité de transmission du système et de stockage d'informations. Autrement dit, plus la qualité de la vidéo s'améliore, plus les exigences en matière de ressources augmentent.

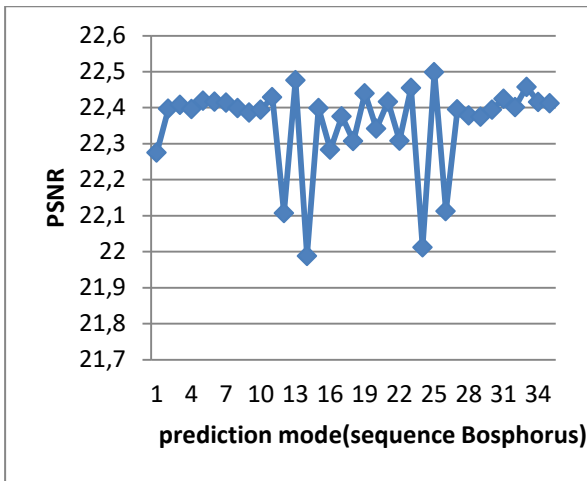
Les figures 3.5, 3.6 et 3.7 montrent les valeurs complètes du PSNR, SNR et taux de compression respectivement pour les 35 modes et pour les cinq séquences vidéo utilisées. On observe qu'après le 10ème mode, le PSNR, le SNR et le taux de compression se dégradent et qu'après le 27ème mode, ils reviennent à leur maximum.



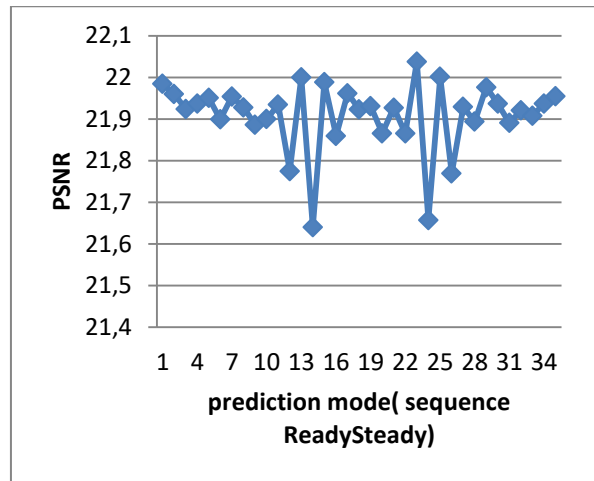
(a)



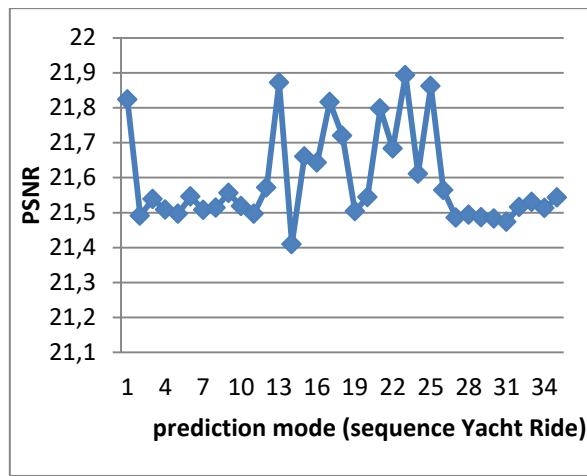
(b)



(c)



(d)



(e)

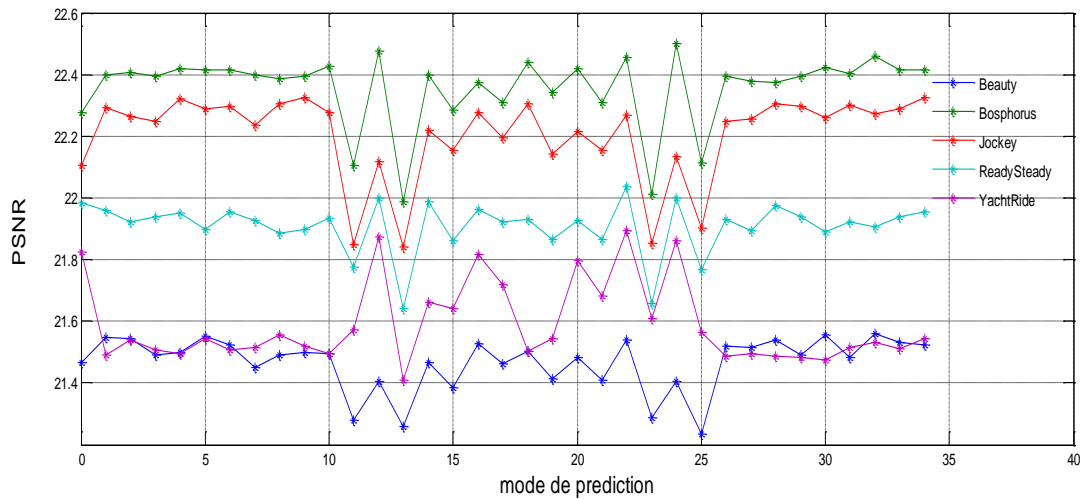
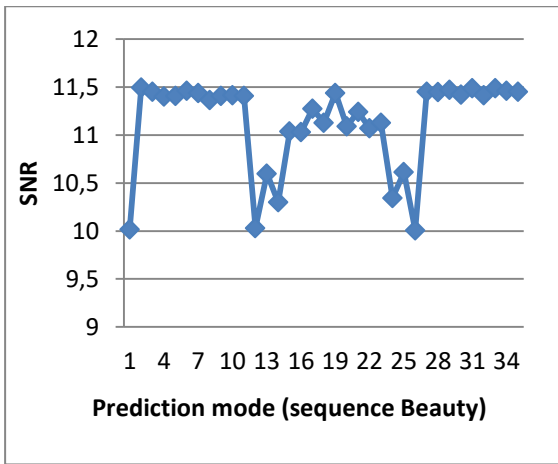
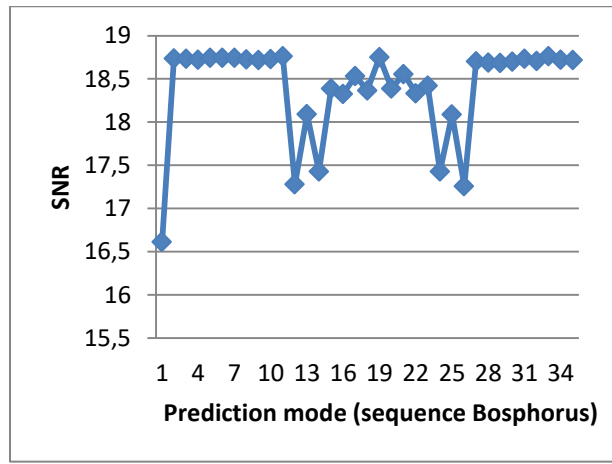


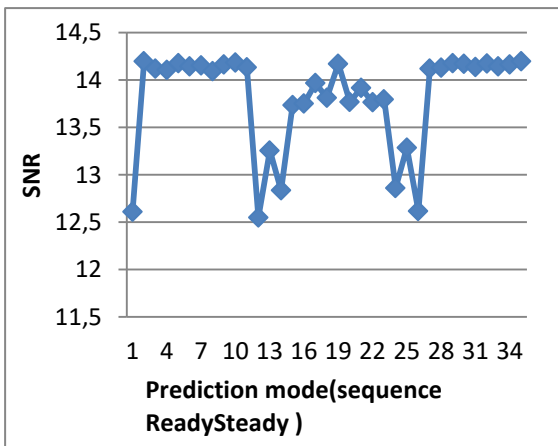
Figure 3.5 PSNR pour 35 modes d'intra prédiction



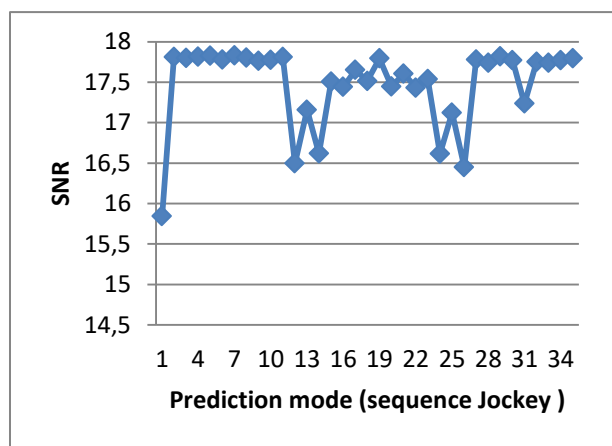
(a)



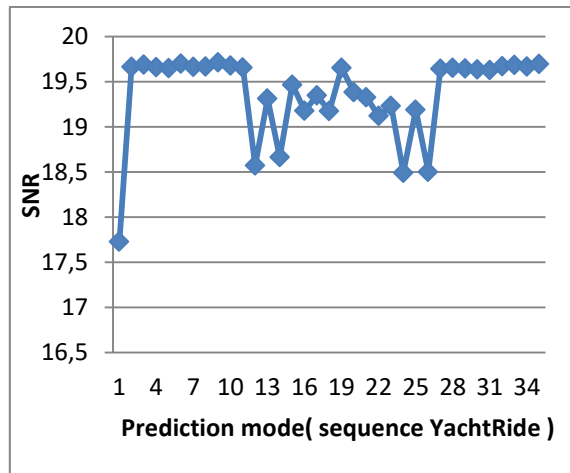
(b)



(c)



(d)



(e)

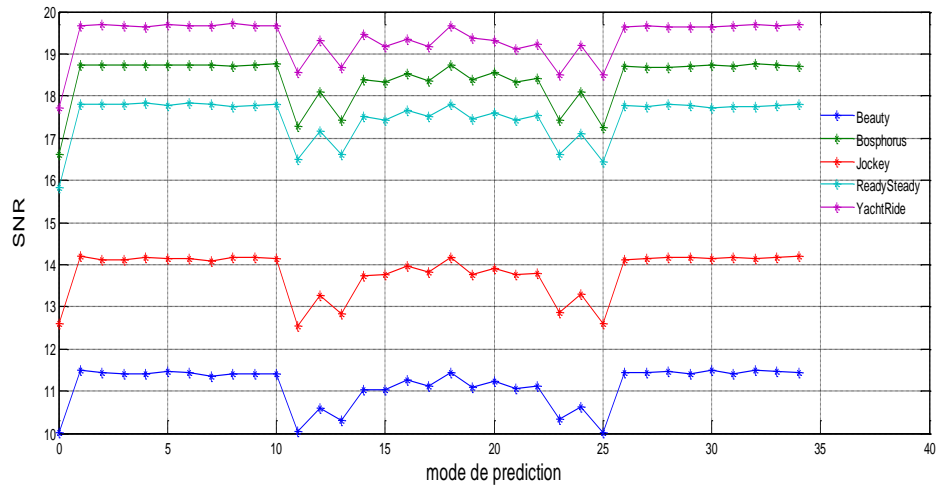
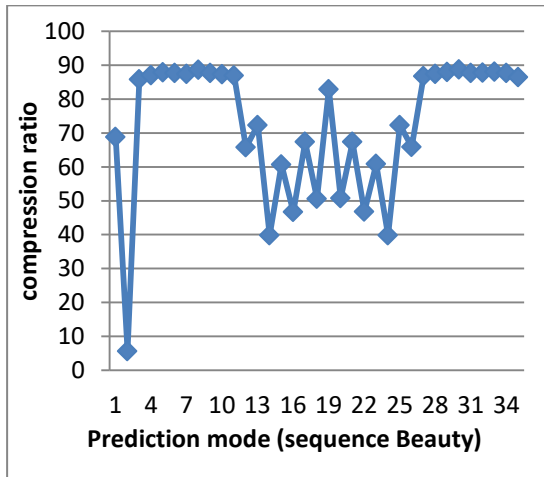
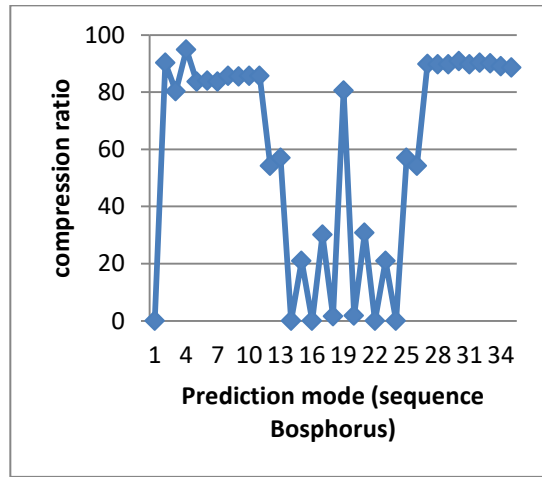


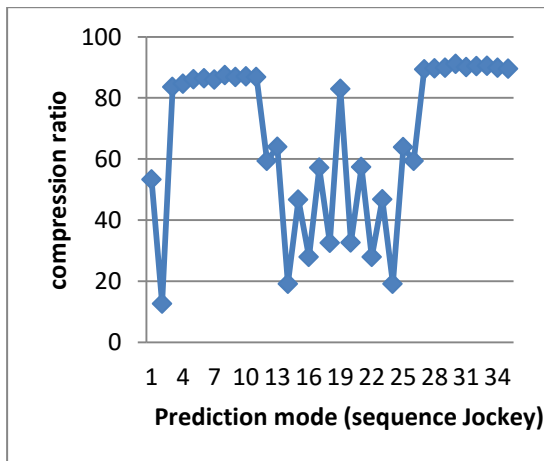
Figure 3.6 SNR pour 35 modes d'intra prédiction



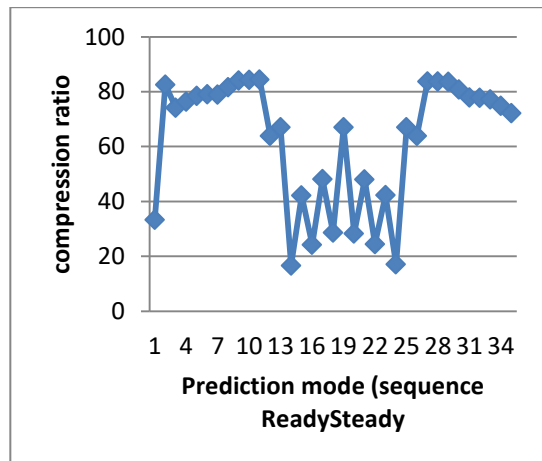
(a)



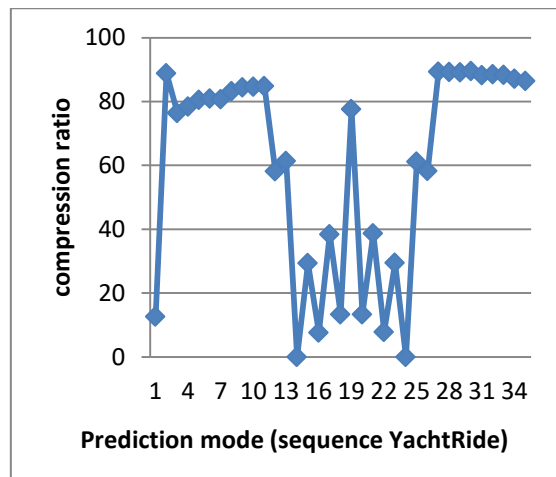
(b)



(c)



(d)



(e)

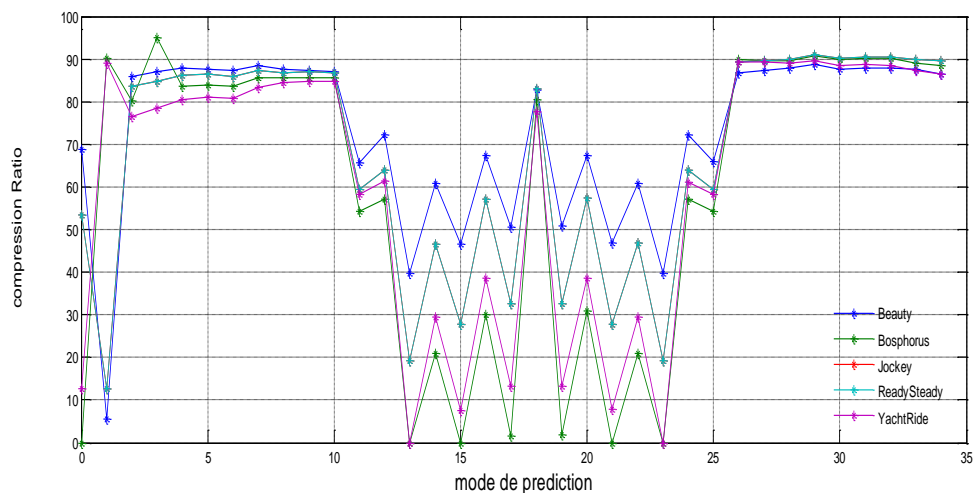


Figure 3.7 Taux de compression pour 35 modes de prédiction intra.

Au point de vue de l'influence du contenu vidéo, on voit que des séquences telles que Beauty ou Jockey montrent peu de changements directionnelles complexes. Cela encourage des modes de prédiction cohérents et constants. En revanche, des séquences plus actives ou détaillées telles que ReadySteadyGo ou YachtRide présentent une dispersion plus importante dans les PSNR, ce qui témoigne d'une grande sensibilité du mode sélectionné à la texture locale. Les valeurs du SNR sont généralement en accord avec les PSNR, cependant leur plage plus étendue dans certaines séquences indique des variations de bruit ou de structure qui ne peuvent pas être modélisées par un unique mode.

Par ailleurs, en se basant sur les PSNR et SNR globaux, on remarque que les moyennes générales des cinq séquences montrent un PSNR global moyen de 21,9842 dB et un SNR global moyen de 15,2068 dB. Ces chiffres indiquent une qualité de reconstruction satisfaisante lors du codage intra HEVC, même en présence de compression et valide une qualité de signal suffisante, avec toutefois un écart relativement faible (environ 1 dB) entre les modes les plus performants et les moins performants. Cependant, elle met en évidence la possibilité d'améliorer la qualité générale en perfectionnant le choix du mode et que la ressemblance des performances entre plusieurs modes (27, 29, 33) pourrait expliquer une diminution de l'espace de recherche sans compromettre significativement la qualité, ce qui diminuerait les complications du calcul.

Les résultats de la simulation montrent que l'algorithme proposé peut améliorer le PSNR et réduire le débit binaire des séquences 1080p par rapport aux algorithmes de décision intra-prédiction rapide de l'état de l'art (taux de compression moyen de 64,468%, PSNR moyen de 21,9842% et un SNR moyen de 15,2068). En comparant des séquences vidéo hautes résolutions avec des résolutions inférieures, on peut conclure que ces séquences ont des valeurs PSNR plus élevées, un débit réduit et un gain considérable en SNR.

Les résultats de la simulation montrent que la précision et l'efficacité de l'algorithme d'intra-prédiction proposé est augmentée en termes de taux de compression dans les fichiers YUV par rapport aux résultats déjà existants [154] dont la simulation a été faite sur des vidéos YUV de résolution 352x256 et 704x128 comme données d'entrée, et a eu comme résultat un taux de compression moyen de 15,3% qui semble trop faible et a atteint le double de celui du cas précédent ou il est établi à 37,93% pour la résolution de 704x128. En conséquence, le taux de compression moyen a augmenté de 22,6 %, tandis que pour les séquences au format 1080p, le taux de compression moyen a augmenté de 49,16 %. C'est ce qui nous fait soutenir l'opinion de [155] selon laquelle l'amélioration de la qualité d'entrée du bloc d'intra-prédiction peut améliorer la sortie globale d'intra-prédiction, de sorte que les images à haute résolution peuvent fournir une meilleure sortie d'intra-prédiction.

Les résultats de la simulation ont montré que l'une des techniques offertes par le codeur HEVC pour optimiser la bande passante tout en conservant une meilleure qualité vidéo est l'algorithme de prédiction intra HEVC utilisé pour les résolutions vidéo YUV (1920x1080) afin d'obtenir plus de clarté dans les images compressées qui vont être transmises. Cela peut donner la possibilité de réaliser un codage en temps réel lorsqu'il est combiné à des optimisations architecturales, logicielles et algorithmiques dans les transmissions vidéo sur de longues distances avec différents moyens tels que la fibre optique.

3. 6 Conception d'une architecture de transmission OTDM des séquences vidéo

Suite à l'optimisation de la compression vidéo à la source grâce à la prédiction intra du standard HEVC, la prochaine étape est de garantir une transmission efficace et sûre de ces données compressées via un canal physique.

Dans un système de transmission complet, le codage source sert à diminuer la redondance temporelle et spatiale des séquences vidéo, alors que le codage canal a pour objectif d'ajuster ces informations aux exigences du canal de communication, en assurant leur préservation face aux erreurs, interférences et pertes éventuelles.

Dans cette seconde phase, nous nous intéressons à la conception d'une architecture de multiplexage par division de temps optique (OTDM) pour la diffusion des séquences vidéo compressées. L'objectif est d'exploiter les hauts débits fournis par les systèmes optiques multiplexés temporellement afin de transmettre efficacement des flux vidéo HEVC tout en réduisant au maximum les erreurs de transmission et les délais ce qui permet une optimisation de l'utilisation de la bande passante du système.

Cette méthode permet de compléter le mécanisme de compression vidéo par un modèle de transmission approprié, assurant à la fois une excellente qualité d'image et une solidité du transport, deux critères indispensables pour des applications haut débit telles que la vidéoconférence, la diffusion de contenus multimédias ou encore la surveillance à distance.

L'émergence de nouveaux services gourmands en bande passante, les applications multimédias, l'essor d'Internet, la téléphonie voix sur IP, la vidéo, etc., continuent de mettre la pression sur l'augmentation des capacités de transmission. La principale difficulté n'est plus vraiment dans le support à large bande passante et à faible atténuation, mais dans les

modules d'émission et de réception, combinant des fonctions électroniques et optoélectroniques rapides, et nécessitant également une transmission simultanée, par multiplexage qui était la meilleure solution pour gérer une telle demande [156].

Le travail mené a permis d'étudier, d'évaluer et d'analyser la mise en œuvre de ce système de transmission. En examinant les caractéristiques des techniques de fonctionnement de chaque bloc de la chaîne de transmission vidéo (Figure 3.8). La performance des codes correcteurs d'erreurs, qui dépend des algorithmes de codage et de décodage, de la fibre optique et de plusieurs autres critères, notamment le débit, la distance de propagation et la bonne qualité de transmission [157], s'est avérée être l'un des nombreux problèmes. Cela suggère qu'il y a toujours place pour la recherche et l'avancement dans ce domaine d'étude.

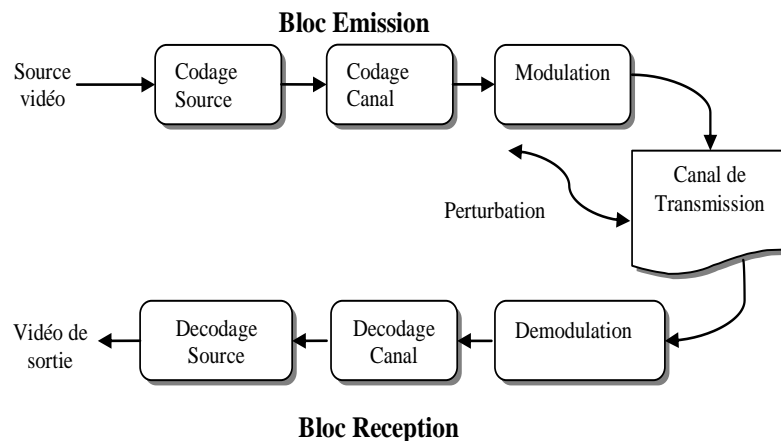


Figure 3.8 Schéma de principe d'une liaison optique

Sur la base de l'étude de la littérature, il a été constaté que la conjonction de l'OTDM multiplexage par répartition temporel et du système de modulation par déplacement de phase différentielle (DPSK) permettra de garantir que la vidéo transmise parcourt la distance maximale et il est la solution conventionnelle pour combiner de nombreux signaux optiques modulés dans la même fibre optique. Ainsi la réduction du problème d'erreur sur les bits et la plage utilisée de la bande passante soit optimisée. Pour cette raison la simulation proposée dont la compression vidéo par l'encodeur HEVC (l'encodage de la source) a été utilisé pour donner la flexibilité de débit souhaitée, avec la diminution du retard introduit et réglage de la consommation d'énergie au prix d'une optimisation de la bande passante. Pour la réalisation des expériences, il a été nécessaire d'étudier des vidéos aux formats « .dat » et « .yuv » pour l'évaluation qualitative de la dégradation du signal après certains tests. Le système proposé a été implémenté dans le logiciel OptiSystem et les évaluations ont été effectuées par des mesures du BER (taux d'erreur binaire) et des métriques objectives PSNR (rapport signal/bruit de crête (Figure 3.9).

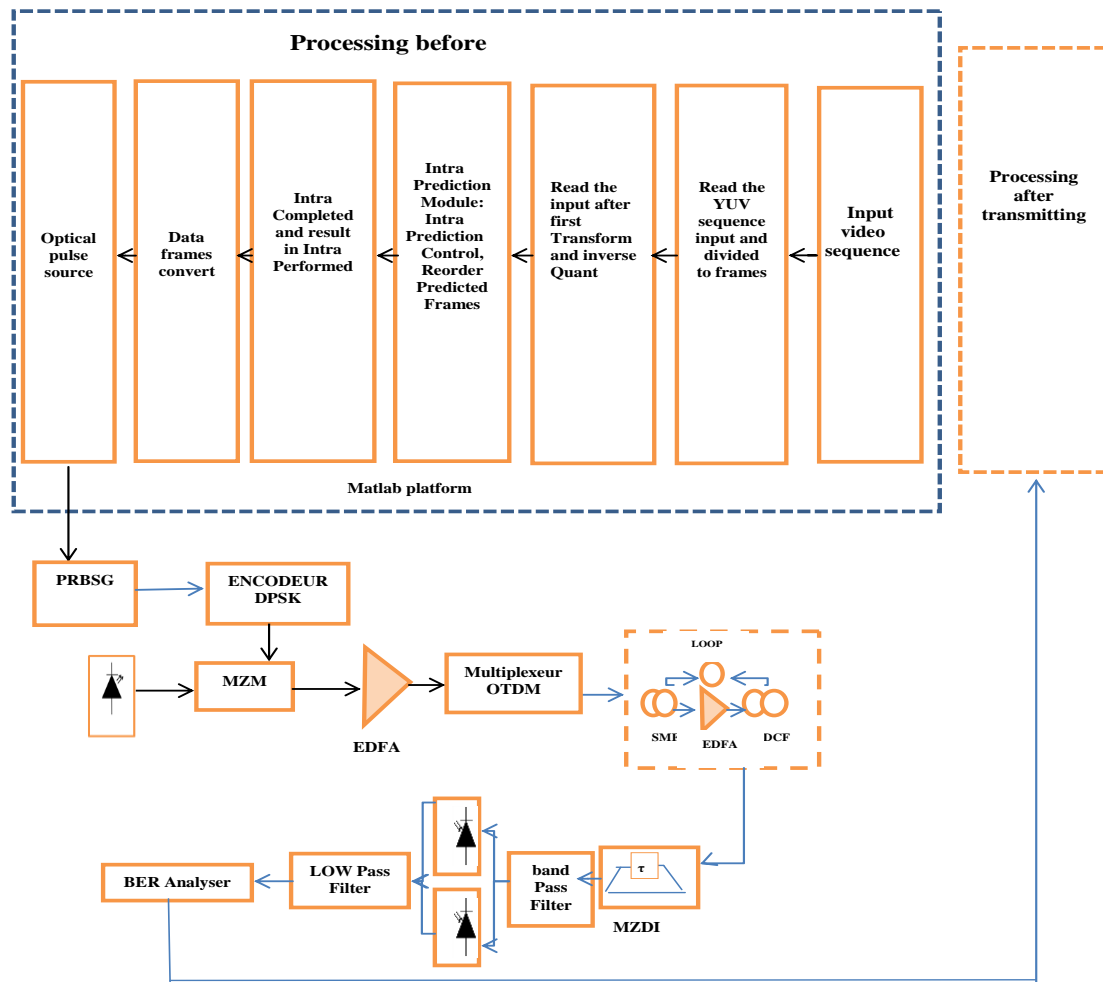


Figure 3.9 Modèle proposé du système de transmission vidéo par fibre optique

Dans cette partie, les principales contributions se résument comme suit :

La conception et l'évaluation d'un système de transmission vidéo UHD adapté aux certaines applications telle la télésurveillance. Le système repose sur l'utilisation de diodes laser à puissances variables et l'architecture OTDM avec modulation DPSK, visant à maximiser le débit de transmission et l'efficacité spectrale. Des algorithmes ont été développés pour analyser l'impact de la bande passante via les filtres optiques et évaluer la qualité des séquences UHD reçues. Les simulations confirment la faisabilité de la transmission optique de flux vidéo compressés, avec une optimisation notable de la bande passante et une bonne qualité de réception.

Evaluer les performances du système sur la base de l'analyse du facteur Q et du taux d'erreur sur les bits (BER) qui prouvent la stabilité du système dans diverses conditions de canal optique.

3. 7 Principes de fonctionnement du modèle proposé

Dans cette partie, un fichier binaire (bit Stream) de la séquence Bosphorus codée en utilisant HEVC est utilisé comme une entrée pour le système de transmission optique. La vidéo est compressée et quantifiée en utilisant l'outil Matlab pour générer le bit Stream. Un mode de codage Intra seulement et un mécanisme de découpage de trame ont été utilisés pour atteindre l'exigence de faible retard et l'amélioration de la résilience aux erreurs [157]. La configuration expérimentale du système optique proposé est illustrée à la figure 3.10. L'entrée est constituée de fichiers vidéo bruts enregistrés au format YUV avec une résolution de 1080p (FHD). La vidéo

YUV est appliquée en entrée avec une fréquence de 30 images qui sont ensuite prétraitées, décomposée en ses images correspondantes et une seule image a été traitée. Une fois convertis en bit et sauvegardés en fichier .dat, transmis au niveau de l'émetteur optique, le signal passe d'abord par un modulateur DPSK, puis un multiplexeur OTDM dont ils maintiennent ensemble les flux de données à bas débit. Côté récepteur, un démultiplexeur OTDM reconstruit le flux de données puis démodule par DPSK.

```

close all;
clear all;
obj = VideoReader('Bosphorus.avi');
a = read(obj);
frames = get(obj, 'NumberOfFrames')

for i=1:10
    I(i).cdata = a(:,:, :, i);
end

s = size(I(i).cdata);
% fid = fopen('foreman_part_qcif.yuv');
fid = fopen('Bosphorus.avi');
B = fread(fid, 'ubit1');
BB= B';
save('ORIG.dat', 'BB', '-ascii');
csvwrite('testB2.dat', BB)

```

Pour chaque utilisateur, la séquence de bits correspondant au fichier vidéo compressé a été téléchargée vers un générateur de séquence de bits pseudo-aléatoire PRBS. Le signal électrique de non-retour à zéro (NRZ) en sortie des PRB modulait directement une diode laser CW (Onde continue) émettant une longueur d'onde de 193,1 THz, ce qui est un moyen efficace d'obtenir une bande passante bien déterminée et dont l'utilisation est généralement préférable pour les longues distances et favorisant des débits de données élevés (>10 Gbps) [158]. Le générateur de séquence de bits et le générateur d'impulsions NRZ génèrent le flux de données de base et le débit binaire à 30 Gbps, qui sont passés à travers un codeur différentiel à l'aide d'un précodeur duobinaire. La modulation des données en bande de base a été effectuée en pilotant un modulateur Mach-Zehnder (MZM). Ainsi, le flux de données a à la fois des informations d'amplitude et de phase. Deux bandes latérales ont été générées avec suppression de porteuse optique (DSB-SC). Pour minimiser les pertes dépendantes de la polarisation, un contrôleur de polarisation (PC) a été utilisé avant le MZM et après, un amplificateur à fibre dopée à l'erbium (EDFA) a été utilisé pour optimiser la puissance du signal. Ensuite, un filtre passe-bande optique (OBPF) pour atténuer le bruit d'émission spontanée amplifié (ASE) produit par l'EDFA [159]. Chacune des branches des modulateurs MZM est retardée à l'aide d'un dispositif de retard (Temporisation) d'une fraction de la période binaire. Pour multiplexer N signaux optiques de période T, la temporisation nécessaire Δt_i pour la i branche est:

$$\Delta t_i = i.TN_s ; \quad i = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (3.5)$$

Les ondes optiques de chaque canal sont multiplexées et transmises sur un canal dans une étendue de 50 Km de fibre à dispersion compensée basé sur un DCF de 10 Km afin de minimiser les dégradations induites par la dispersion qui limite la bande passante du canal [160]. La liaison optique doit respecter la règle (3.6) :

$$L_{SMF} \times D_{SMF} = -(L_{DCF} \times D_{DCF}) \quad (3.6)$$

Alors, le multiplexeur optique à répartition dans le temps combine le flux de données de base des quatre canaux en un flux de données à grande vitesse. Dans cette simulation, le débit binaire de base du système est de 30Gbps, et il y a quatre canaux. Ainsi, le débit binaire de transmission de ce système est de 120Gbps . Après la transmission, un démultiplexeur OTDM

est utilisé pour séparer chaque canal, seul à traiter dans son bloc récepteur qui est constitué d'un interféromètre à retard Mach Zehnder (Mach Zehnder Delay Interferometer MZDI) pour démoduler le signal optique DPSK. Ensuite, un photo-détecteur équilibré composé de deux diodes PIN connectées en série est utilisé pour récupérer le signal modulé. Pour étudier les performances de cette liaison, le signal reçu est orienté vers un filtre passe bas (LPF) pour être démoduler ainsi définir la bande passante électrique du récepteur, puis un répéteur pour resynchronisée (3R), les figures 3.10 ,3.11 et 3.12 représentent le système de transmission vidéo par fibre optique (OTDM-DPSK). Différents paramètres ont été utilisés pour évaluer les performances du système (OTDM-DPSK) qui sont donnés dans les tableaux 3.4, 3.5 ,3.6 et 3.7. La conception et la simulation des modèles se font avec Logiciel OptiSystem.

Tableau 3.4 Les paramètres de la simulation

Paramètres	Valeurs
longueur d'onde du canal	193.1THz
Débit binaire pour chaque canal	30 Gbps
Dispersion SMF	17 ps/nm/km
Dispersion DCF	-85 ps/nm/km
Atténuation SMF	0.2 dB/km
Atténuation DCF	0.5 dB/km

Tableau 3.5 Paramètres de l'EDFA

Paramètres	Valeurs
Noise Figure	4 dB
Output power	32 Mw

Tableau 3.6 Paramètres du MZDI

Paramètres	Valeurs
Coefficient de couplage	5
Retard du MZDI	33.33×10^{-12} s

Tableau 3.7 Paramètres du LPF

Paramètres	Valeurs
Fréquence de coupure	22.5 GHz
Retard du MZDI	33.33×10^{-12} s

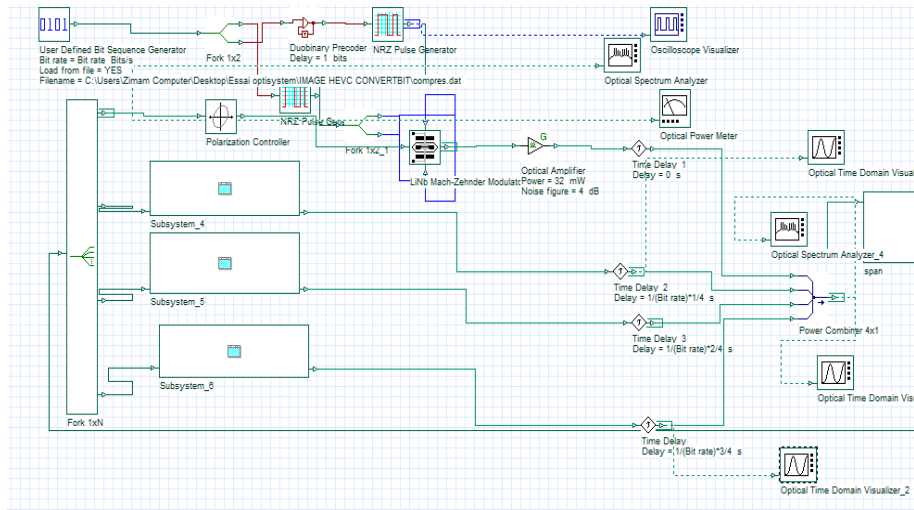


Figure 3.10 Schéma d'une liaison optique OTDM

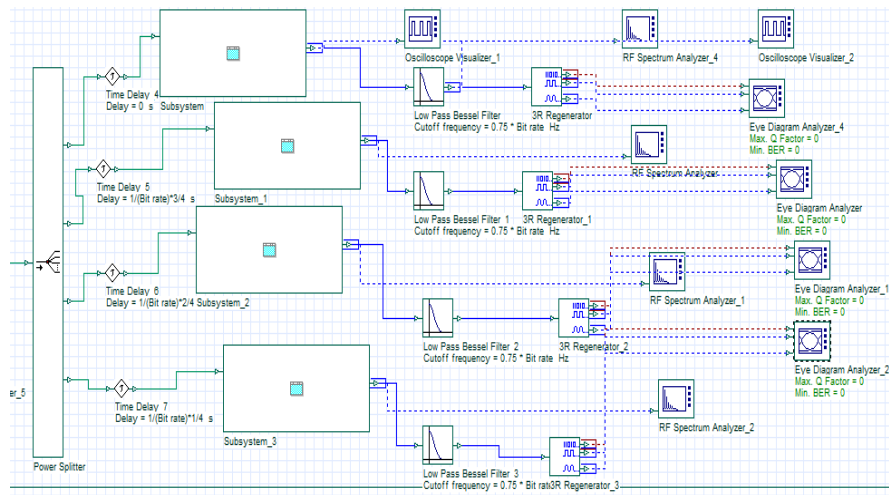


Figure 3.11 Schéma d'une liaison DPSK

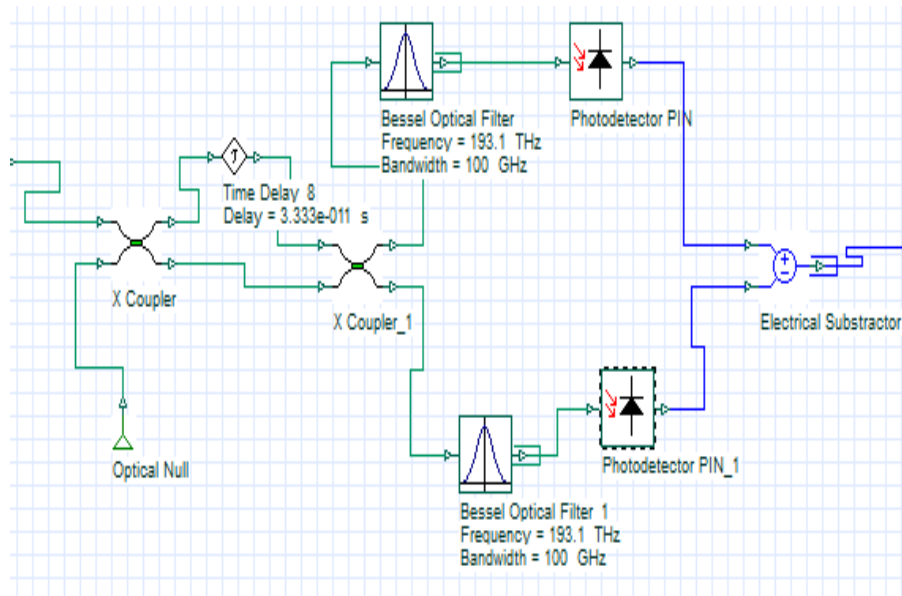


Figure 3.12 Schéma du bloc subsystem 3 (DPSK)

3.8 Environnement de co-simulation

Dans ce travail, une technique de co-simulation est employée en combinant **OptiSystem** pour la modélisation de la liaison optique et **MATLAB** pour l'analyse des données. OptiSystem gère la transmission optique complète y compris la génération des signaux, la propagation dans la fibre, les effets non linéaires, et la réception. Tandis que MATLAB exécute la simulation, traite les résultats et présente les courbes d'évaluation [161].

Cette méthode exploite les atouts propres à chaque environnement : la précision physique et optique d'OptiSystem et l'adaptabilité algorithmique de MATLAB. La co-simulation simplifie aussi l'incorporation de flux vidéo compressés provenant de fichiers HEVC, leur transformation en séquences binaires et leur insertion dans le générateur de bits d'OptiSystem.

Cette combinaison logicielle fournit une plateforme expérimentale réaliste et contrôlée, qui permet de reproduire des situations de transmission vidéo à large bande et d'analyser leur performance dans diverses conditions (distance, intensité du laser, type de modulation).

3.8.1 Optimisation conjointe du codage vidéo et la liaison optique

La notion d'optimisation conjointe des paramètres d'une liaison optique (niveaux de puissance, distance) et des paramètres du codec (prédiction, outils de résistance aux erreurs) ont été exploré sur la base du rapport signal/bruit maximal (PSNR) comme mesure objective de la qualité vidéo, Le taux d'erreur sur les bits (Bit Error Rate BER) et le facteur de qualité (Quality Factor Q-factor) comme les principaux paramètres pour définir la qualité de la liaison optique, sachant qu'ils dépendent des effets non linéaires (l'effet Kerr, Auto-modulation de phase (SPM) et modulation de phase croisée (XPM) qui se produisent dans la fibre optique lors de la transmission. Le BER est calculé à partir de Q pour une statistique Gaussienne des bruits exprimé par [162]:

$$\text{BER} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q\text{-factor}}{\sqrt{2}}\right) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}(Q\text{-factor})} \exp\left(-\frac{(Q\text{-factor})^2}{2}\right) \quad (3.7)$$

3.8.2 Intégration des données vidéo compressées dans le système optique

Cette simulation a mis en concurrence deux méthodes de transmission : la première se fonde sur la modulation OTDM-DPSK associée à un codage RZ, tandis que la seconde s'appuie sur l'OTDM-DPSK combiné à un codage NRZ. Le choix du format de modulation est essentiel pour les performances globales du système, particulièrement en ce qui concerne le taux d'erreur, la robustesse et l'utilisation du spectre. Notamment, la forme RZ propose une distinction temporelle supérieure des symboles, ce qui la rend plus résistante aux interférences inter-symboles, tandis que le format NRZ offre une densité spectrale plus élevée.

La méthode adoptée dans cette étude repose sur l'exploitation des résultats de compression vidéo HEVC, obtenus par le biais de diverses techniques d'intra-prédiction. Les données compressées sont ensuite mises en préparation pour la transmission optique : elles sont converties en flux binaires (converti en Bit) et stockées sous forme de fichiers .dat via MATLAB, puis intégrées dans le générateur de séquences de bits au sein de l'environnement OptiSystem.

Cette adaptation offre la possibilité de modéliser une scène réaliste où un contenu vidéo compressé est véritablement inséré dans un canal optique multiplexé, puis transmis en utilisant divers formats de modulation. Le but est d'identifier la méthode optimale pour préserver la qualité de la vidéo tout en augmentant le taux de transmission et en réduisant le taux d'erreurs.

3. 9 Interprétation des résultats expérimentaux

Les figures 3.13 ,3.14 ,3.15 et 3.16 fournissent une analyse complète des performances du système OTDM suggéré, considérant divers paramètres essentiels : la puissance du laser émis, le type de modulation optique, la distance de transmission et la configuration spectrale du signal reçu.

3.9.1 Analyse de l'impact de la puissance laser émise sur la qualité de transmission

Afin d'évaluer les performances du système, une étude a été menée en faisant varier la puissance du laser CW pour un débit de symboles de 30 Gb/s en utilisant la modulation DPSK et une longueur totale de la fibre de 60 Km, composée de 50 Km de fibre monomode (SMF) suivis de 10 Km de fibre de compensation de dispersion (DCF). La puissance du laser est ajustée, et les performances sont analysées en traçant le Q-factor en fonction de la variation de la puissance CW et du logarithme du BER(log (BER)) en fonction de cette même puissance.

Cette analyse permet de déterminer la puissance optimale nécessaire pour assurer une transmission fiable avec une qualité maximale.

Les sous-figures (a), (b), (c) et (d) de la figure 3.13 permettent la comparaison du facteur de qualité (Q-factor) et le taux d'erreur binaire (BER) logarithmique en fonction de la puissance transmise dans le cas des modulations RZ (Return-to-Zero) et NRZ (Non-Return-to-Zero).

Nous constatons que l'augmentation de la puissance optique entraîne une amélioration du facteur de qualité et une réduction du BER, jusqu'à un certain point. Au-delà de ce seuil, les performances peuvent être altérées par des effets non linéaires ou des bruits induits.

Parmi toutes les puissances testées, les valeurs de -15 dBm pour le format RZ et -19 dBm pour le format NRZ se distinguent comme étant les puissances optimales pour la transmission avec une modulation DPSK. Ces niveaux permettent d'obtenir un haut niveau de qualité tout en conservant un BER assez bas pour assurer une transmission fiable.

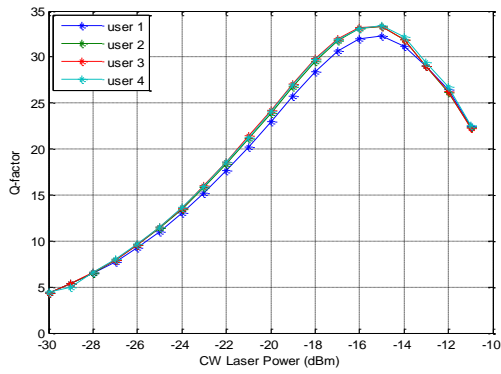
Le format RZ démontre régulièrement une performance supérieure à celle du NRZ, en particulier à haute puissance, le rendant plus approprié pour les environnements où la marge d'erreur est faible dont ce n'est pas le cas d'une transmission vidéo.

3.9.2 Influence de la distance sur les formats DPSK-RZ et DPSK-NRZ

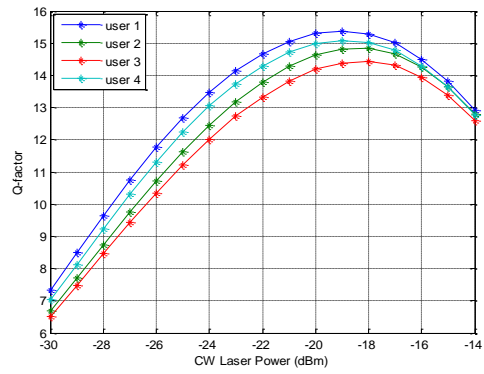
Une fois la puissance du laser choisie et afin d'avoir la distance optimale, on fait varier la distance de 60 Km à la distance où le seuil est vérifié.

Les sous-figures (e) et (f) de la figure 3.14 présentent l'évolution du Q-factor et du BER sur le quatrième canal OTDM en fonction de la distance de propagation. Les résultats mettent en évidence pour les deux systèmes DPSK (RZ) et DPSK (NRZ) ou il y a une dégradation progressive des performances au fur et à mesure que la distance augmente, en raison de l'accumulation des effets de dispersion chromatique et des phénomènes non linéaires dans la fibre.

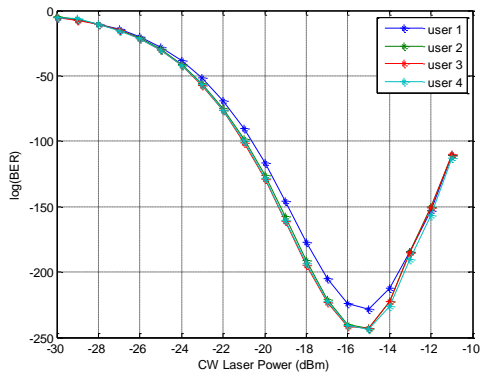
Pour les sous-figures (g), (h), (i) et(j) de la figure 3.15, dès 60 Km, la différence de performance entre NRZ et RZ se révèle importante. Le format RZ conserve un facteur Q supérieur de plus de 1 dB comparé au NRZ, avec un taux d'erreur binaire significativement inférieur, ce qui indique une tolérance supérieure à la dispersion et une meilleure capacité à résister aux interférences inter-symboles. Mais, Il est également à noter que le seuil critique de performance ($Q < 6$, ou $BER > 10^{-9}$) est atteint plus vite en NRZ, dès 70 Km ce qui permet qu'on peut en déduire que le DPSK (NRZ) est précis pour augmenter la distance de propagation.



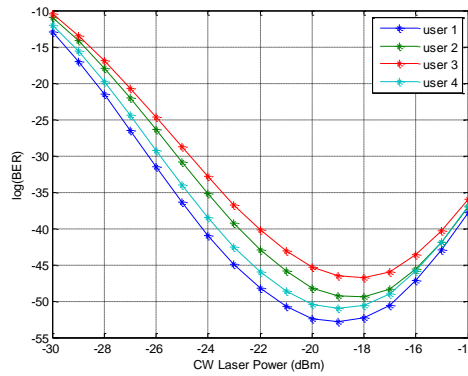
(a)



(b)

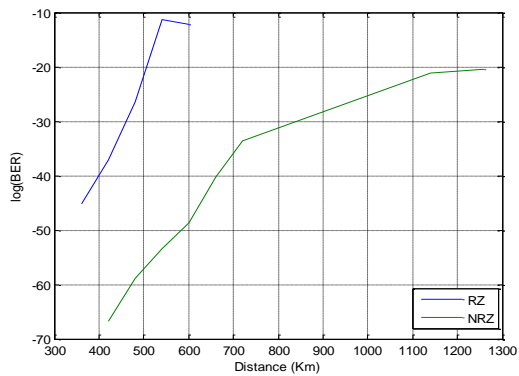


(c)

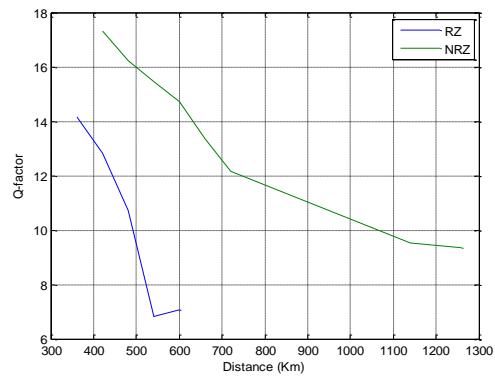


(d)

Figure 3.13 (a), (c), (b), (d) Facteur de qualité et logarithme du taux d'erreur binaire par rapport à la puissance laser transmise de CW pour la modulation RZ et NRZ.

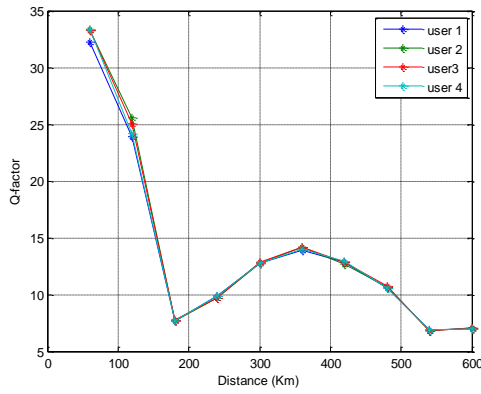


(e)

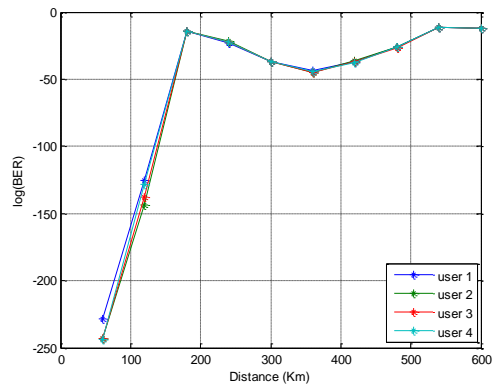


(f)

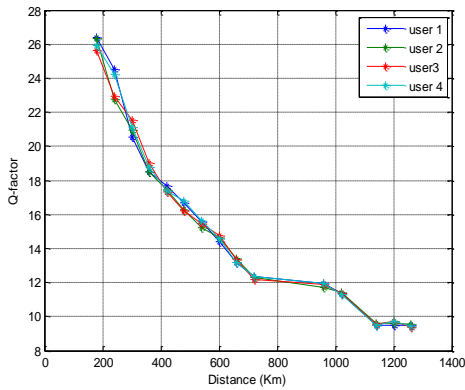
Figure 3.14 (e), (f) Facteur de qualité et logarithme du taux d'erreur binaire en fonction de la distance de transmission du 4ème canal pour les systèmes DPSK -NRZ et DPSK-RZ.



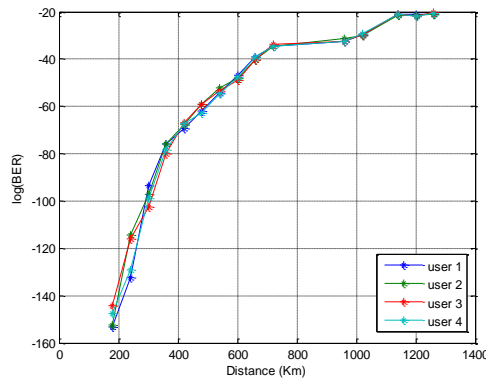
(g)



(h)



(i)



(j)

Figure 3.15 (g), (i), (h), (j) Facteur de qualité et logarithme du taux d'erreur binaire en fonction de la distance de transmission du système proposé.

3.9.3 Analyse spectrale du signal reçu

Sachant que plus la largeur du spectre est grande, plus la dispersion est importante donc plus les impulsions optiques se chevauchent et plus il est difficile de récupérer les données à la réception. En comparant les deux formats de modulation, on constate que la largeur spectrale de (NRZ) est inférieure à celle de (RZ) comme le montre la figure 3.16.

La courbe (1) présente un spectre plus large en raison de ses impulsions plus courtes, ce qui augmente sa sensibilité à la dispersion chromatique et nécessite une bande passante de réception plus élevée, pouvant entraîner des interférences inter-symboles (ISI) si le système n'est pas optimisé. Elle comporte des zéros plus fréquents dans le domaine temporel, ce qui augmente la largeur de bande, mais un avantage en synchronisation, pour ces transitions qui sont plus fréquentes. On remarque aussi que la puissance crête plus élevée du RZ (à puissance moyenne identique) dégradant l'intégrité de la phase critique pour la détection DPSK.

Pour la courbe (2) le rapport puissance crête/moyenne plus faible du NRZ minimise ces distorsions non linéaires, préservant l'information de phase. Il y a moins de transitions ce qui réduit les pertes et la dispersion dans la fibre.

Le format NRZ, grâce à sa largeur spectrale, sa résistance à la dispersion et sa diminution des non-linéarités, est plus approprié pour les systèmes OTDM-DPSK, surtout dans le cadre de liaisons longue distance ou à haute puissance. Le spectre présenté dans la figure 3.16 illustre ces atouts, le NRZ (courbe 2) démontrant des propriétés exceptionnelles pour maintenir la précision du signal.

Par conséquent, le système OTDM-DPSK-NRZ offre de meilleures performances que le système OTDM-DPSK- RZ.

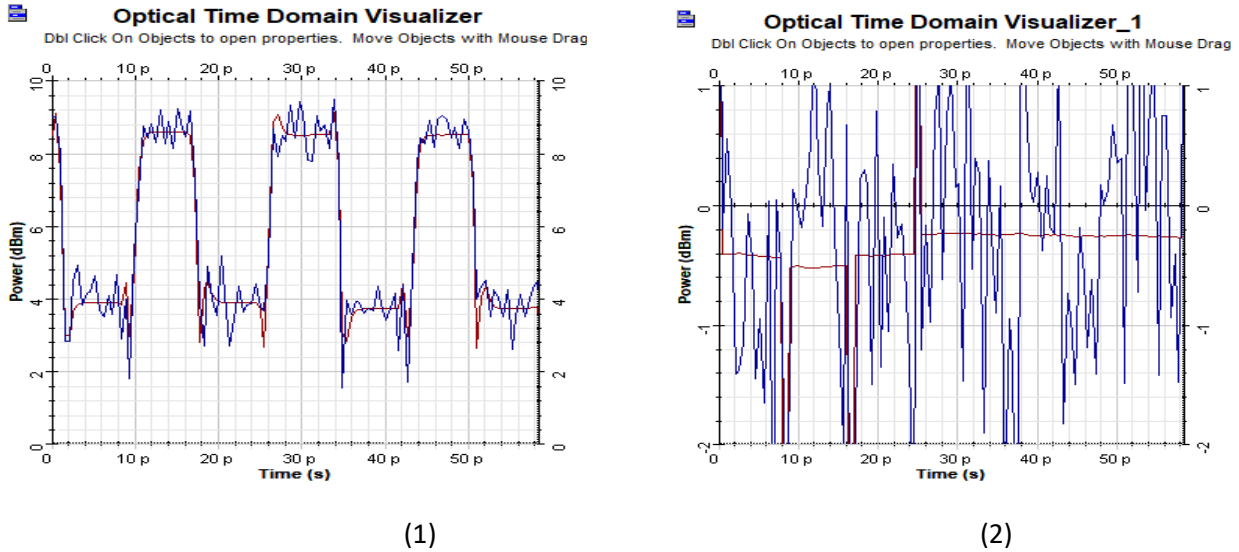


Figure 3.16 Spectre reçu (1) RZ, (2) NRZ

3.9.4 Evaluation de l'architecture OTDM proposée

Une fois l'optimisation de la puissance injectée, la distance optimale vérifiée et la comparaison des deux schémas est effectuée on maintient les paramètres suivants pour la suite de la simulation : le système OTDM -DPSK-NRZ, Puissance du laser CW= -19dB et d'une distance de 60 km. Dans ce qui suit, l'analyse de transmission de différentes vidéos est présenté où, le rôle de l'intra-prédiction de la vidéo codée dans l'optimisation est montré.

La probabilité d'erreur théorique de communication peut être calculée à partir du rapport signal sur bruit (SNR) [161]. Il existe une relation inverse entre le (SNR) et le (BER). Comme on peut le voir sur la figure 3.17, une série de courbes de taux d'erreur sur bit par rapport au signal sur bruit pour différents cas, qui indique un taux binaire décroissant ,donc une meilleure performance et moins d'erreurs fondamentalement. Le BER mesuré en fonction du SNR lorsque différents flux sont transmis dans différents types de scène permet de viser l'impact du type de séquence sur la qualité vidéo. Il est exprimé par : [162].

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{SNR}}{\sqrt{2}}\right) \quad (3.8)$$

Les résultats obtenus dans [163] confirment l'importance de la nature des séquences vidéo sur les performances de transmission à travers une liaison optique. Nous avons observé les comportements suivants pour différentes classes de séquences :

- Pour les séquences statiques (Beauty), le BER est relativement élevé lorsque le SNR est faible.
- Pour les séquences avec mouvement rapide sur fond statique (Jockey), une augmentation du SNR entraîne une réduction significative du BER.
- Pour les séquences à mouvement rapide de plusieurs objets sur un fond stable (ReadySteadyGo), les courbes de BER sont très proches, indiquant une certaine stabilité dans le comportement du système pour ces conditions dynamiques.

Ces observations montrent que, de manière générale, plus une séquence est dynamique, plus l'impact du SNR est significatif. À partir d'un certain seuil, une élévation du SNR permet de réduire efficacement le taux d'erreurs, ce qui est illustré dans la figure 3.17.

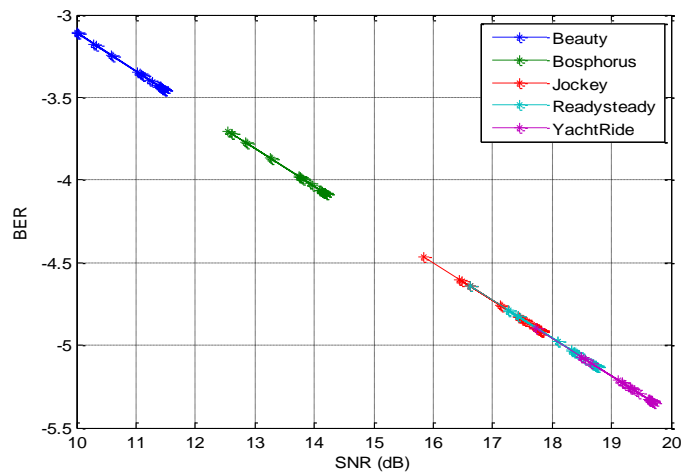


Figure 3.17 BER vs SNR curve for different video scenes

Les résultats obtenus selon la figure 3.18 confirment ceux obtenus dans les sections précédemment. Elle permet de :

- Montrer que certains modes intra sont plus efficaces que d'autres face aux perturbations introduites par la liaison optique.
- Les résultats mettent en évidence deux zones efficaces dont on remarque que le minimum du taux d'erreur binaire est obtenu pour les modes <10ème et >27ème, ce qui peut orienter des optimisations futures de l'encodeur.

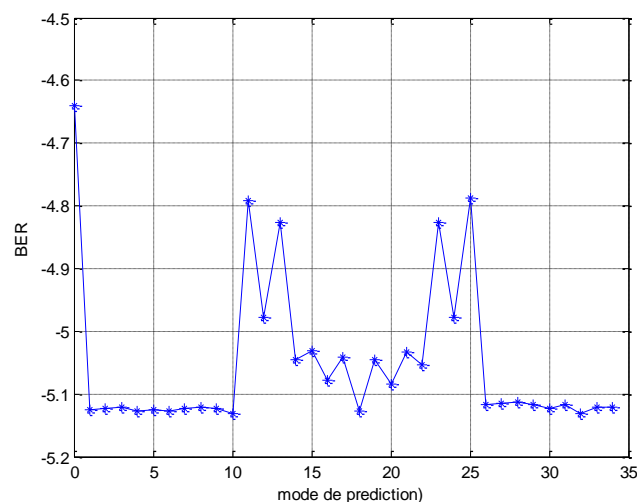


Figure 3.18 BER vs intra prediction mode curve for Bosphorus video scene

De plus, en tenant compte des critères de performance du système de transmission tels que la distance, le débit, la modulation, la bande passante, etc... Nous avons étudié l'impact de la largeur de bande du filtre de Bessel ajouté en cascade au niveau du récepteur sur la qualité du signal reçu. Ce filtre optique est utilisé pour réduire les effets de dispersion et de distorsion

temporelle des signaux optiques transmis. La courbe du BER en fonction de la bande passante pour différentes longueurs de fibre (60, 120, 180 km), montre que pour une bande passante allant de 05Ghz à 20Ghz, nous obtenons le meilleur taux d'erreur binaire (BER).

On constate aussi, en augmentant ou en diminuant la bande passante, la qualité de la transmission se dégrade au-delà de ces valeurs. Cependant pour les performances de la modulation OTDM-DPSK illustrée à la figure 3.19, le seuil est respecté pour la transmission des vidéos dynamiques, 9dB pour 60km. La sous-figure 3.19 (a) montre que la bande passante de 05Ghz à 20Ghz pour chaque utilisateur, le système DPSK, permet un BER efficace.

Alors, dépassé cette plage de fréquences, le BER diminue, augmentant les interférences entre symboles et dégradant les performances de la liaison. Les fréquences inférieures ne conviennent pas pour passer des débits de 30Gb/s et celles supérieures ne permettent pas de filtrer l'impact des effets non linéaires entre les canaux. Il est donc important de choisir une bande passante appropriée pour le filtre Bessel optique afin d'optimiser la qualité de la vidéo reçue. La bande passante doit être suffisamment large pour accueillir toutes les fréquences nécessaires de la vidéo et suffisamment petite pour réduire la distorsion.

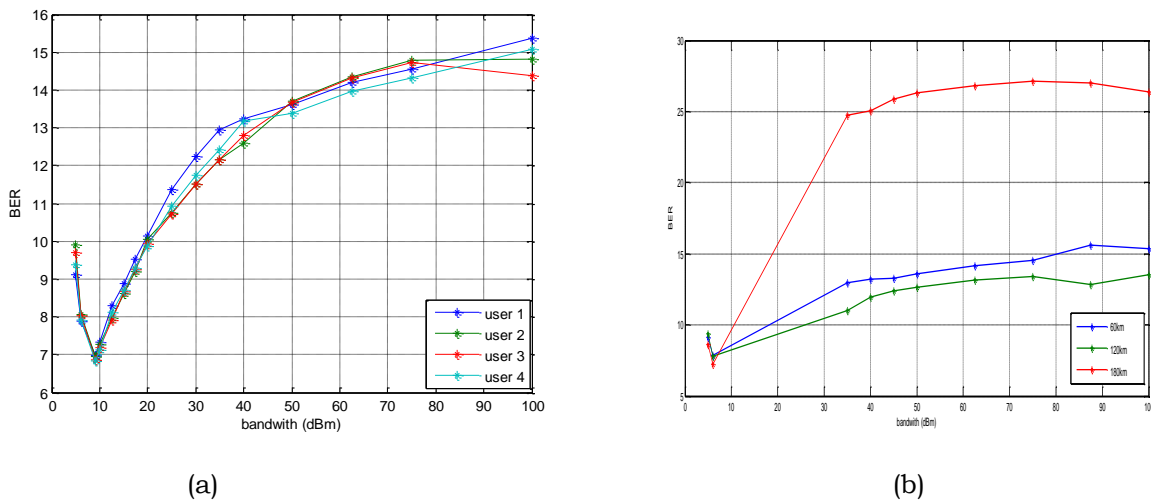


Figure 3.19 BER en fonction de la bande passante du filtre (BP) : (a) pour différents utilisateurs ; (b) pour un utilisateur pour différentes distances

3. 10 Conclusion

Dans ce travail, les performances d'un système de transmission vidéo optique ont été étudiées et analysées. Les avantages des techniques de compression HEVC et du multiplexage OTDM utilisant le schéma DPSK (Differential Phase Shift Keying) ont été combinés. Le codage de la source et du canal est conçu séparément puis mis en cascade. Plus précisément, la simulation a d'abord été réalisée avec différents modes d'intraprediction, dont l'utilisation permet de recevoir une qualité vidéo acceptable dans des modes avec un BER plus élevé, prolongeant ainsi la distance pour une qualité de transmission vidéo acceptable. En effet, l'utilisation de différents modes dans différentes scènes réduit la quantité d'informations qui permet au décodeur de mieux reconstruire les parties altérées de l'image à partir de blocs inchangés. De plus, pour les performances du système OTDM-DPSK et pour l'optimisation de l'exploitation de la bande passante, cela semble mieux avec une longueur de fibre de 60 km à 180 km et pour une puissance minimale de - 19dBm avec le format de modulation NRZ. Cependant, la compression vidéo peut être utilisée pour réduire la quantité de données transmises sur la fibre [164], ce qui pourrait améliorer l'efficacité de la transmission optique en réduisant la congestion du réseau. Cela améliore l'efficacité de la transmission vidéo sur le réseau et permet à plus d'utilisateurs de partager la bande passante disponible. Dans les travaux ultérieurs, il

est prévu d'utiliser des techniques d'apprentissage automatique pour développer l'outil de compression, un nouveau mode d'intra-prédiction qui remplacera ou complétera simplement l'intraprediction conventionnelle, qui s'intègre toujours dans l'architecture hybride basée sur des blocs utilisée dans de nombreux codecs vidéo existants.

Etude de l'Impact du CRF et Comparaison Critique des Approches Expérimentales

4.1 Introduction

Grâce à l'évolution continue de la technologie vidéo et à l'apparition de nouvelles plateformes, les fournisseurs de contenu vidéo s'appliquent à assurer que la qualité de la vidéo répond aux exigences des consommateurs. Face à une contrainte de bande passante, ils cherchent fréquemment une stratégie pour minimiser la consommation de données, et par conséquent l'énergie et les coûts associés. Cette étude examine l'efficacité du taux de qualité des codecs pour améliorer la qualité vidéo tout en réduisant le débit binaire, ce qui est essentiel pour l'efficacité énergétique et économique.

Pour maintenir une qualité visuelle constante dans toute la vidéo, et parmi les nombreux paramètres qui influencent le processus de codage HEVC, le Constant Rate Factor (CRF) qui est un paramètre de contrôle de débit particulièrement important pour de nombreuses applications. Il vise à maintenir une qualité visuelle constante sur l'ensemble de la séquence vidéo, en ajustant dynamiquement le niveau de quantification en fonction de la complexité du contenu.

Dans le cadre de ce processus, les vidéos originales avec des résolutions natives ont été encodées, décodées et redimensionnées grâce à FFmpeg (Fast Forward MPEG). Pour chaque résolution, l'encodage et le décodage ont été réalisés à divers niveaux de quantification.

Dans ce chapitre, nous explorerons l'étude de l'impact du CRF sur la qualité vidéo, la taille des fichiers et les performances de transmission sur liaison optique [165].

4.2 Fondements Théoriques et État de l'Art

La littérature scientifique présente diverses approches d'optimisation de la qualité vidéo et d'évaluation des performances des codecs. Ces derniers peuvent contrôler le débit binaire de sortie d'une vidéo via certains principaux modes de contrôle du débit; Facteur de débit constant (CRF), Débit binaire variable (VBR) et Débit binaire constant (CBR)[166]. Pour le CRF, il laisse le contrôle du débit image par image à l'encodeur afin qu'il atteigne une qualité visuelle de niveau constant, allouant plus/moins de bits à des scènes complexes/simples selon les besoins.

En se fondant sur cette définition, de nombreuses recherches ont été menées. Une méthode d'optimisation dynamique de la qualité QR a été développée dans le projet [167], générant des courbes convexes QR évaluées via les métriques VMAF et PSNR. Les recherches de [168] ont examiné les délais nécessaires pour atteindre des performances optimales, proposant des recommandations spécifiques pour la sélection des codecs selon qu'il s'agisse de streaming en direct ou à la demande. Dans une perspective complémentaire, l'étude [169] s'est concentrée sur les mécanismes de prédiction du débit dans les systèmes de streaming adaptatif. La recherche [170] a effectué une analyse comparative de l'efficacité de compression entre différents codecs, mettant en évidence les gains de débit BD particulièrement significatifs pour la vidéo à la demande. Les auteurs de [171] ont procédé à une évaluation approfondie de l'encodage en mode CRF dans des environnements à mouvement stationnaire et aléatoire,

démontrant la supériorité du codec H.265 pour les séquences à fort mouvement. Leurs observations ont également révélé une diminution notable du PSNR entre les contenus originaux et compressés, sans toutefois entraîner de dégradation visuelle immédiatement perceptible. L'étude [172] a établi une corrélation inverse entre l'augmentation de la valeur CRF et plusieurs paramètres (bitrate, PSNR et VMAF), signalant une détérioration de la qualité vidéo, tandis qu'un CRF réduit améliore la qualité au détriment d'un débit plus conséquent. Les travaux [173] ont confirmé l'existence d'une relation directe entre la valeur du CRF et le bitrate pour les codecs H.264 et H.265, soulignant que des valeurs CRF inférieures permettent d'obtenir une qualité supérieure moyennant un débit plus élevé

Sur la base des constats issus des recherches antérieures, nous détaillons dans ce qui suit notre approche expérimentale.

4. 3 Méthodologie de l'étude

Dans cette recherche, nous étudions la faisabilité de la transmission vidéo sur fibre optique pour optimiser la bande passante avec la mise en œuvre des fonctionnalités du codec HEVC. L'objectif principal est de trouver un équilibre entre débit binaire réduit et qualité visuelle mesurable, afin d'exploiter efficacement la bande passante disponible.

L'évaluation a été effectuée pour cinq types de séquences vidéo en fonction du contenu pour la résolution Full HD (FHD) encodées avec FFmpeg [174] à l'aide du codec H.265/HEVC. Ensuite transmis sur un réseau local ou distant, en mesurant le délai, le taux de perte et la qualité perçue par l'utilisateur final.

Le but visé traite l'impact de la valeur du facteur de débit constant sur l'évaluation objective de la qualité vidéo à l'aide de la métrique PSNR qui compare les séquences compressées aux vidéos originales. Ces mesures sont ensuite utilisées pour tracer des courbes qualité-débit, permettant d'identifier les points de fonctionnement efficaces. Donc, Différentes valeurs du CRF sont utilisées pour évaluer son impact sur la qualité visuelle et la taille du fichier encodé, ainsi que son influence sur les performances de transmission vidéo.

Afin de garantir des comparaisons équitables, toutes les vidéos sont normalisées en taille et durée. L'analyse des corrélations entre les métriques et les paramètres d'encodage permet de prédire la performance sans passer par un encodage complet. Cette approche réduit significativement le temps de traitement et permet une sélection rapide des meilleurs paramètres CRF en fonction de la résolution cible et des contraintes de bande passante du réseau fibre. Ce modèle prédictif facilite ainsi l'adaptation dynamique du flux vidéo dans des conditions réseau variables.

4. 4 Plateforme expérimentale et outils

Notre méthodologie repose sur une approche de co- simulation, utilisant différents logiciels spécialisés pour les différentes étapes du processus : encodage vidéo, conversion de format, et simulation de la transmission optique.

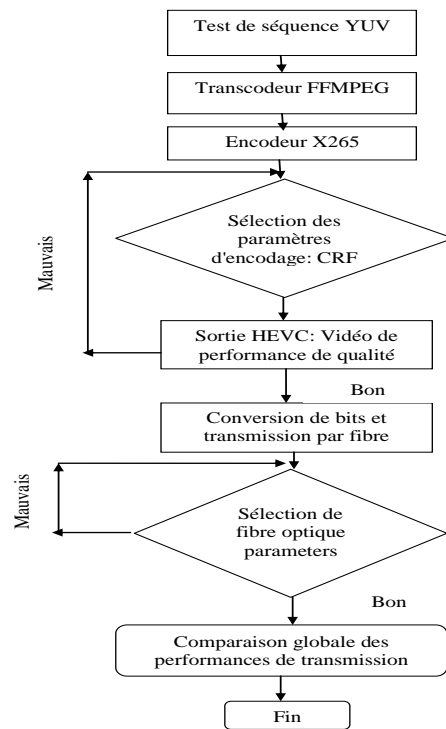


Figure 4.1 Organigramme de la méthodologie

4.4.1 Logiciels utilisés

FFmpeg (Fast Forward MPEG) (avec la librairie libx265) [174]: Cet outil open-source a été utilisé pour l'encodage des séquences vidéo brutes au format HEVC. Plus précisément, la librairie libx265, une implémentation de l'encodeur HEVC, a été employée pour permettre le contrôle du paramètre CRF. Ce software est utilisé par un traitement basé sur des lignes de commande et est particulièrement apprécié pour sa rapidité lors du codage et décodage des fichiers audio et vidéo (Figure4.2). Il est largement reconnu pour sa flexibilité et sa prise en charge d'un grand nombre de codecs et de formats.

Matlab : Ce logiciel de calcul numérique et de programmation a été utilisé pour plusieurs tâches : la conversion des séquences vidéo encodées (ou des séquences brutes) en un flux binaire sous forme de fichier de données (.dat). Cette étape est nécessaire pour pouvoir injecter le signal vidéo dans le simulateur de liaison optique. Potentiellement pour le traitement des résultats, la génération de graphiques et l'analyse des métriques de performance.

OptiSystem (Optiwave Systems Inc.) : Ce logiciel de simulation est spécialisé dans la conception et l'analyse de systèmes de communication optique. Il a été utilisé pour modéliser et simuler la liaison par fibre optique, incluant les composants de l'émetteur, du canal (fibre optique) et du récepteur. OptiSystem permet de configurer en détail les paramètres de chaque composant et d'analyser les performances de la liaison à l'aide de divers instruments virtuels (analyseur de BER, diagramme de l'œil, etc.)

```

C:\Users\Zinou>FFMPEG
ffmpeg version 4.4-full_build-www.gyan.dev Copyright (c) 2000-2021 the FFmpeg developers
built with gcc 10.2.0 (Rev6, Built by MSYS2 project)
configuration: --enable-gpl --enable-version3 --enable-static --disable-w32threads --disable-autodetect --enable-fontc
onfig --enable-iconv --enable-gnutls --enable-libxml2 --enable-gmp --enable-lzma --enable-libsnappp --enable-zlib --enab
le-librist --enable-libsrt --enable-libssh --enable-libzmq --enable-avisynth --enable-libbluray --enable-libcaca --enabl
e-sdl2 --enable-libdav1d --enable-libzvbi --enable-librav1e --enable-libsvtav1 --enable-libwebp --enable-libx264 --enabl
e-libx265 --enable-libxvid --enable-libaom --enable-libopenjpeg --enable-libvpx --enable-libbass --enable-frei0r --enable
-libfreetype --enable-libfribidi --enable-libvidstab --enable-libvmaf --enable-libzimg --enable-amf --enable-cuda-llvm --
-enable-cuvid --enable-ffnvcodec --enable-nvdec --enable-nvenc --enable-d3d11va --enable-dxva2 --enable-libmfx --enable-
libglslang --enable-vulkan --enable-opencl --enable-libcdio --enable-libgme --enable-libmodplug --enable-libopenmpt --en
able-libopencore-amrwb --enable-libmp3lame --enable-libshine --enable-libtheora --enable-libtwolame --enable-libvo-amrwb
enc --enable-libilbc --enable-libgsm --enable-libopencore-amrnb --enable-libopus --enable-libspeex --enable-libvorbis --
enable-ladspa --enable-libbs2b --enable-libflite --enable-libmsofa --enable-librubberband --enable-libsoxr --enable-chr
omaprint
libavutil      56. 70.100 / 56. 70.100
libavcodec     58.134.100 / 58.134.100
libavformat    58. 76.100 / 58. 76.100
libavdevice    58. 13.100 / 58. 13.100
libavfilter    7.110.100 / 7.110.100
libswscale     5.  9.100 / 5.  9.100
libswresample  3.  9.100 / 3.  9.100
libpostproc   55.  9.100 / 55.  9.100
Hyper fast Audio and Video encoder
usage: ffmpeg [options] [[infile options] -i infile]... {[outfile options] outfile}...

```

Figure 4.2 Schéma de l'interface FFMPEG

4.4.2 Désignation d'Ensembles de Données

Le cœur de notre recherche comprend la sélection de séquences vidéo [152] avec diverses caractéristiques spatio-temporelles (couleur, mouvement, contenu) représentatif du contenu diffusé.

Pour simuler les techniques de télécommunication vidéo, nous avons utilisé FFmpeg, un framework multimédia polyvalent pour la réduction, la mise à l'échelle donc un redimensionnement avec des filtres spécifiques ainsi l'encodage / décodage des vidéos originales. Nous avons installé la dernière version stable sur Windows 10 en juin 2021. L'extraction des métriques de qualité a également été implémentée à l'aide de FFmpeg.

Tout d'abord, nous commençons par la conversion des vidéos du format AVI au format YUV pour l'ensemble de données.

Le format AVI est un conteneur de vidéo capable d'intégrer des vidéos compressées via divers codecs. C'est commode pour la lecture et l'encodage, cependant ce n'est pas idéal pour les traitements de haute qualité en raison de la compression et des artefacts qu'il peut générer. C'est pourquoi nous optons pour le format YUV qui fonctionne différemment du RGB. Il permet une meilleure gestion des erreurs et efficacité de la bande passante. Il sépare la luminance (Y) de la chrominance (U et V). Cette séparation est plus proche de la perception humaine, car l'œil est plus sensible aux détails de luminance qu'à la couleur.

Cette conversion est exécutée dans FFmpeg à l'aide d'une ligne de commande ou La résolution sélectionnée est 1920x1080 (Figure 4.3). Ensuite, nous encodons la vidéo à différents niveaux de quantification, allant de 5 à 50 par pas de 5. Ce processus d'encodage est suivi du décodage de la vidéo codée.

Deux variables, les codecs et les paramètres de quantification QP, changent pendant le processus vidéo. Le codec utilisé dans cette recherche est H. 265.

Tableau 4.1: Les résultats de compression en utilisant lib265 du logiciel FFMPEG avec différents CRF

Video sequence (yuv)		YachtRide (Size 1.73Go)	Beauty (Size 1.73 Go)	ReasySteady (Size 1.73 Go)
CRF=17	Bitrate Kb /s	17509.38	28372.24	10375.49
	Size Mo	50.1	81.1	29.6
	PSNR (dB)	44.620	41.465	45.180
CRF=22	Bitrate Kb /s	9229.67	5176.51	5273.07
	Size Mo	26.4	14.8	15.0
	PSNR (dB)	42.037	39.803	42.992
CRF=27	Bitrate Kb /s	4682.24	1218.73	2869.84
	Size Mo	13.4	3.49	8.21
	PSNR (dB)	39.394	39.187	40.490
CRF=32	Bitrate Kb /s	2196.21	594.71	1572.76
	Size Mo	6.29	1.70	4.50
	PSNR (dB)	36.763	38.396	37.789

4.4.4 Extraction des Courbes représentatives

PSNR est la métrique de qualité qui est extraite dans notre approche. Dans les sections suivantes, le PSNR est étudiés d'un point de vue statistique. Cependant, avant de partir en ce qui concerne les détails du calcul PSNR, nous devons expliquer la méthode dans laquelle le débit binaire vidéo est déterminé.

4.4.5 Obtention du Débit Binaire

L'objectif est de tracer des courbes qualité-débit en utilisant la métrique PSNR. Pour cela, nous encodons les vidéos avec différents niveaux de CRF. A chaque niveau, nous obtenons une valeur de PSNR et calculons le débit vidéo correspondant.

Le débit représente la quantité de données transmises par seconde, exprimée en bps, Kbps ou Mbps. Il est dérivé de la taille du fichier encodé, du nombre total d'images et de la fréquence d'images. La formule utilisée comme spécifié dans l'équation (4.1) [176]. Tous les calculs sont réalisés dans notre environnement Matlab.

$$\text{Débit} = \text{Taille de la vidéo} / \text{Durée} \quad (4.1)$$

Où la durée est exprimée en minutes multipliée par 0.0075.

4.5 Discussion et évaluation des résultats de la première partie

L'analyse des performances de compression vidéo est un facteur clé dans le développement de systèmes de codage efficaces. Dans cette étude, nous avons exploré la relation entre le débit binaire, la qualité perçue (évaluée par le PSNR) et le facteur de quantification (CRF) pour trois séquences vidéo différentes : YachtRide, Beauty et ReasySteady.

Toutes ces séquences ont une taille initiale identique de 1,73 Go. Cette analyse vise à comprendre comment les diverses caractéristiques du contenu affectent l'efficacité de la compression et d'établir les compromis optimaux entre qualité et débit pour différents types de contenus.

4.5.1 Analyse de la Relation Débit-PSNR

4.5.1.1 Perspectives générales

La courbe débit-PSNR (Figure 4.4) met en évidence une relation non linéaire entre ces deux paramètres pour l'ensemble des séquences vidéo. Quand on augmente le débit, la qualité augmente aussi, mais pas de façon proportionnelle. On constate que pour chaque séquence,

l'augmentation du PSNR devient négligeable au-delà d'un certain seuil de débit, ce qui indique un point de rendement décroissant.

Cette phase où la qualité cesse d'augmenter de manière significative, malgré l'augmentation du débit est déterminante. Elle indique la limite à ne pas dépasser si on veut optimiser la bande passante sans compromettre la qualité perçue.

4.5.1.2 Comparaison des séquences

Les trois séquences illustrent des comportements différents en termes d'efficacité de compression :

- **Beauty** : Cette séquence montre la plus forte variation de débit allant de 594,71 à 28372,24 Kb/s pour une fluctuation relativement faible de PSNR (de 38,40 à 41,47 dB), une hausse limitée à 3,07 dB. Cela indique que cette séquence contient des propriétés visuelles complexes (beaucoup de détails, textures fines, mouvement, lumière variable) qui exigent un débit significativement plus élevé pour obtenir des améliorations légères en termes de qualité perceptuelle, donc bien plus de données pour encoder correctement ces détails. Cela confirme le concept du rendement décroissant. Pour ce type de contenu, augmenter le débit ne donne pas forcément une amélioration visible proportionnelle. Il s'agit d'une situation classique où l'on doit veiller à ne pas gaspiller la bande passante pour un gain imperceptible.
- **YachtRide** : Elle offre une amélioration de qualité (PSNR) supérieure à Beauty, pour une hausse du débit plus modérée puisqu'elle passe de 2196,21 Kb/s à 17509,38 Kb/s, avec une augmentation du PSNR de 7,86 dB (de 36,76 à 44,62 dB), ce qui représente un progrès significatif. Ceci signifie que cette séquence peut être compressée de manière plus performante, elle renferme des zones plus uniformes ou des mouvements plus simples. YachtRide propose une meilleure compression, offrant ainsi une qualité perceptuelle supérieure.
- **ReadySteady** : Parmi les trois séquences examinées, elle présente l'efficacité de compression la plus élevée, avec un taux de variation du débit de 1572,76 à 10375,49 Kb/s qui demeure inférieur aux autres séquences. Néanmoins, elle a permis d'augmenter le PSNR de 37,79 à 45,18 dB, soit une hausse de 7,39 dB. Un profit similaire à YachtRide, mais avec un débit globalement inférieur. Avec le plus faible débit constaté à CRF=17, elle parvient au PSNR le plus important (45,18 dB). Cela signifie que le contenu de cette séquence est plus facile à compresser. Elle contient peu de mouvements et moins de détails visuels compliqués. Ainsi, le codec a la capacité de représenter cette vidéo avec moins d'informations tout en préservant sa qualité même avec une bande passante réduite.

Pour toutes les séquences, une inflexion est visible autour de CRF=27, où l'accroissement du débit commence à générer des gains de qualité plus notables. Ce point pourrait constituer un compromis idéal entre qualité et débit pour les applications où les ressources de bande passante sont restreintes.

Plusieurs études récentes soutiennent cette remarque. Par exemple, l'ajustement du paramètre CRF favorise des économies de débit considérables tout en maintenant une qualité visuelle acceptable, ce qui suggère l'existence d'un point de compromis optimal entre qualité et débit pour différents contenus vidéo [177]. En outre, dans [178], le réglage du CRF pour chaque représentation vidéo permet de réduire le débit moyen de 18,80% à 32,59% pour une qualité équivalente, démontrant l'importance de choisir un CRF approprié pour maximiser la qualité sous contrainte de bande passante. Enfin, pour [179], l'optimisation conjointe du CRF et de la résolution par scène permet des économies de débit de 34,42% à 42,67% tout en maintenant la

qualité perçue, ce qui valide l'idée d'un compromis optimal entre qualité et débit via le réglage du CRF.

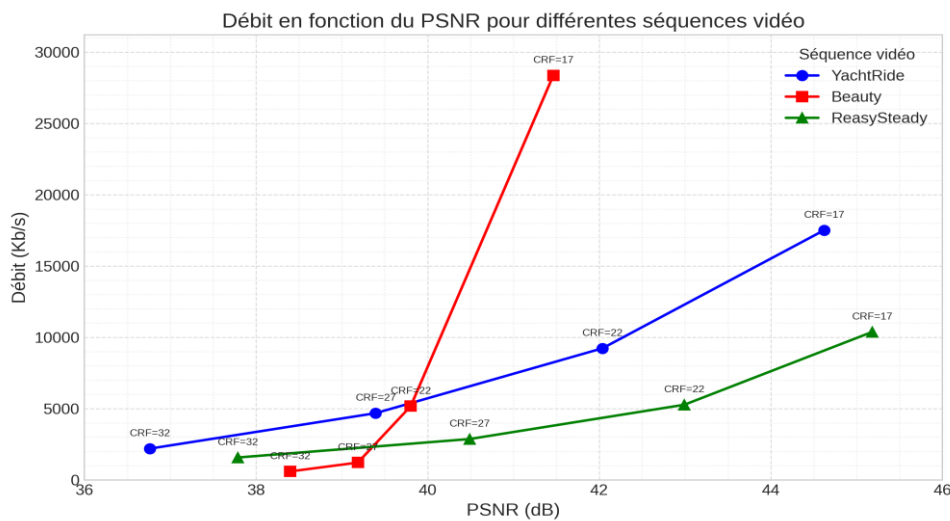


Figure 4.4 Débit en fonction du PSNR

4.5.2 Analyse de la Relation Débit-CRF

La figure 4.5 présente une courbe débit-CRF qui révèle une relation exponentielle entre ces deux paramètres, un aspect particulièrement évident sur l'échelle logarithmique. Selon les principes théoriques de quantification des codecs vidéo contemporains, une augmentation linéaire du CRF pour toutes les séquences entraîne une diminution exponentielle du débit.

4.5.2.1 Sensibilité au CRF par séquences

➤ **Beauty** : Cette séquence réagit fortement aux changements de CRF, avec une réduction de débit de 97,90% entre CRF=17 et CRF=32. Cette réduction est très importante pour une perte de qualité relativement faible (3,07 dB), ce qui indique que cette séquence contient des détails visuels qui peuvent être significativement simplifiés sans impact majeur sur la qualité perçue.

➤ Entre CRF=17 et CRF=32, YachtRide connaît une diminution de débit de 87,46%. Cependant, cette réduction est associée à une dégradation de la qualité de 7,86 dB, bien plus significative que dans la séquence Beauty. Cela implique que le contenu de YachtRide, comprenant des éléments visuels cruciaux pour la qualité perçue comme les mouvements rapides de la caméra, les reflets sur l'eau, les variations de lumière et les textures complexes (voiles, vagues, ciel), est pris en compte. Lorsque l'on augmente le CRF (par conséquent, on compresse davantage), ces détails se détériorent et la dégradation devient perceptible.

➤ La séquence ReadySteady subit une chute de 84,84% de son débit entre CRF=17 et CRF=32, ce qui est une réduction significative. La dégradation de qualité est de 7,39 dB, proche de celle de YachtRide (7,86 dB), par conséquent, leur sensibilité à la compression est similaire. Mais contrairement à YachtRide, ReadySteady parvient à maintenir la qualité à faible débit. Le contenu de ReadySteady est légèrement moins complexe ou moins critique visuellement, Les détails supprimés par la compression ont moins d'impact sur la perception. En d'autres termes, pour un même niveau de compression, l'image reste plus acceptable sur le plan visuel. Elle est plus adaptée aux situations où la bande passante est restreinte, tout en préservant une qualité acceptable.

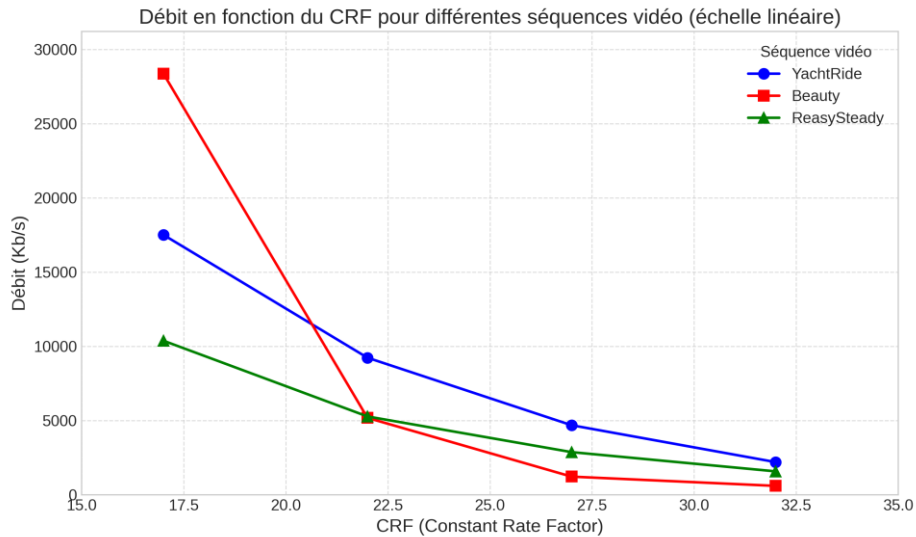


Figure 4 .5 Débit en fonction du CRF

4.5.2.2 Rendement de compression pour divers niveaux de CRF

L'analyse de la relation entre le débit et la qualité (mesurée en PSNR) en fonction de différentes valeurs de CRF révèle une amélioration significative de l'efficacité de compression à mesure que le CRF s'accroît. Avec un CRF de 17, il est nécessaire en moyenne d'utiliser 428,58 Kb/s pour obtenir une augmentation de 1 dB dans le PSNR. Le coût baisse progressivement à 157,65 Kb/s à CRF=22, 73,66 Kb/s à CRF=27, et s'élève à 38,63 Kb/s à CRF=32. Cela signifie que la compression s'avère de plus en plus avantageuse en matière de débit, bien que la qualité pure se dégrade. Cette technique illustre le concept du rendement décroissant : les premiers décibels de qualité sont très coûteux, alors qu'à un niveau de qualité moins élevé, chaque dB supplémentaire nécessite moins de moyens. Lors d'une diffusion vidéo par fibre optique, où la largeur de bande peut être limitée, ce genre d'analyse aide à déterminer une plage optimale de CRF.

4.5.3 Impact du Contenu Vidéo sur l'Efficacité de Compression

4.5.3.1 Caractéristiques du contenu et compressibilité

Les trois séquences vidéo ne répondent pas de manière identique à la compression. Les différences sont dues à leur contenu visuel, c'est-à-dire aux types d'images qu'elles renferment.

- Beauty présente des textures fines (peaux, cheveux, motifs complexes), des dégradés lents (transitions douces entre les couleurs) et beaucoup de détails visuels qui sont très sensibles à la compression. Si on compresse trop, la perte devient vite visible (flou, artefacts). C'est pourquoi elle a besoin d'un débit très élevé à CRF=17 pour garder une bonne qualité. Mais à CRF élevé, la compression devient très agressive, et comme elle supprime beaucoup de détails, le débit chute fortement.
- YachtRide dévoile un mélange de zones à peu détails (ciel, mer) et de zones richement détaillées en action (bateau, vagues, objets en mouvement). Elle offre une compression modérée mieux que Beauty, mais inférieure à ReadySteady. A un taux de compression élevé, la dégradation de la qualité est plus marquée, suggérant que les régions détaillées ou en mouvement sont davantage affectées par la compression.
- ReasySteady, malgré son nom suggérant une stabilité d'image, elle est la plus facile à compresser et atteint les meilleures valeurs de PSNR à tous les niveaux de CRF, indiquant un contenu plus favorable à la compression, moins de mouvement, moins de textures complexes, ou des images plus stables.

4.5.3.2 Sélection adaptative du CRF selon la nature du contenu vidéo

Il est important de régler le CRF selon le contenu visuel de la vidéo, car cet ajustement aide à établir un équilibre optimal entre qualité et débit, surtout dans un contexte de diffusion vidéo ou de restrictions liées à la bande passante. Chaque vidéo réagit différemment à la compression.

Les vidéos avec beaucoup de détails (comme Beauty) Si on compresse trop (CRF élevé), la perte de qualité devient vite visible. Une valeur entre CRF=22 et CRF=27 est un bon compromis. Pour des contenus plus simples similaires à YachtRide et ReadySteady, ils supportent mieux la compression. A CRF=22, elles conservent une très bonne qualité visuelle (PSNR supérieur à 42 dB) Et on obtient une réduction de débit importante par rapport à CRF=17, donc une économie en bande passante.

4. 6 Synthèse des analyses et perspectives de recherche

Ce type d'analyse contribue à modifier intelligemment les paramètres de l'encodage, en particulier pour des applications telles que le streaming ou la transmission par fibre optique, où il est essentiel de trouver un équilibre entre la qualité et le bande passante. Cela établit également les fondements pour des systèmes de compression plus efficaces, capables de se modifier en fonction de chaque type de contenu.

La courbe débit-PSNR indique que les améliorations de qualité tendent à se réduire quand le débit augmente au-delà d'un certain seuil. Autrement dit, il existe un point au-delà où ajouter du débit n'apporte pratiquement plus de gain visible.

La courbe débit-CRF suit une forme exponentielle. Cela implique qu'en augmentant légèrement le CRF, on peut fortement diminuer le débit, ce qui est utile pour économiser la bande passante.

La performance de la compression varie selon le type de contenu. Par exemple, la séquence Beauty nécessite presque trois fois plus de bande passante que ReadySteady pour une qualité équivalente, ce qui démontre que certains contenus sont bien plus difficiles à compresser. Dans la plupart des situations, une valeur de CRF comprise entre 22 et 27 paraît appropriée. Elle offre un bon équilibre entre qualité d'image et optimisation de l'espace de stockage, peu importe la vidéo analysée.

4. 7 Configuration de la liaison optique simulée (sous OptiSystem) deuxième partie

Suite à l'analyse du codage source et l'optimisation du taux de compression par le biais de l'ajustement du paramètre CRF, nous sélectionnons La séquence ReadySteady pour la simulation optique en raison de sa forte efficacité de compression. Elle offre le meilleur compromis entre qualité visuelle et débit, avec un PSNR élevé et une réduction de débit importante. Son contenu, plus simple à compresser, la rend plus robuste face aux dégradations du canal optique. Cette séquence est par la suite convertie en flux binaire brut (.dat) pour servir de signal d'entrée dans la simulation optique.

Dans cette seconde section, nous étudions la transmission par fibre optique. L'objectif est d'évaluer l'impact du canal optique (la longueur de la fibre) et du débit binaire sur la qualité de la diffusion vidéo compressée, en considérant les effets physiques tels que l'atténuation, la dispersion et le bruit. Mesurée par le facteur Q (Quality factor) et le taux d'erreur binaire (BER - Binary Error Rate).

Le logiciel OptiSystem est utilisé pour effectuer la simulation, ce qui permet de modéliser chaque élément de la chaîne et l'évaluation du rendement global en fonction des conditions de transmission.

4.7.1 Simulation d'une liaison par fibre optique pour un canal classique

La liaison optique simulée sous OptiSystem suit une architecture classique inspirée de [165]. Elle opère à un débit binaire de 10 Gbit/s. Du côté émetteur, un générateur de bits pseudo-aléatoires (PRBS) est utilisé pour tester la liaison, c'est un module capable de charger un fichier vidéo binaire. Ces données sont converties en impulsions électriques au format NRZ, puis modulées par un modulateur externe Mach-Zehnder (MZM) alimenté par une source laser continue (CW Laser) émettant à 193.1 THz (environ 1550 nm). Le signal optique modulé est injecté dans une fibre monomode standard (SMF) caractérisée par des paramètres cités dans le tableau 4.2. La longueur de cette fibre varie de 10 km à 105 km selon les scénarios étudiés. Aucun amplificateur optique ni compensateur de dispersion n'est intégré dans cette configuration de base. A la réception, une photodiode PIN convertit le signal optique reçu en signal électrique, ensuite filtré par un filtre passe-bas Bessel. Enfin, un analyseur de BER et un visualiseur de diagramme de l'œil sont utilisés pour évaluer la qualité de transmission (Figure 4.6).

Tableau 4.2 les caractéristiques de la fibre SMF utilisée

SMF	Dispersion	Aeff	n1	Atténuation
	ps/nm/km	μm^2	m ² /W	dB/km
	17	76.5	2.6e-020	0.2

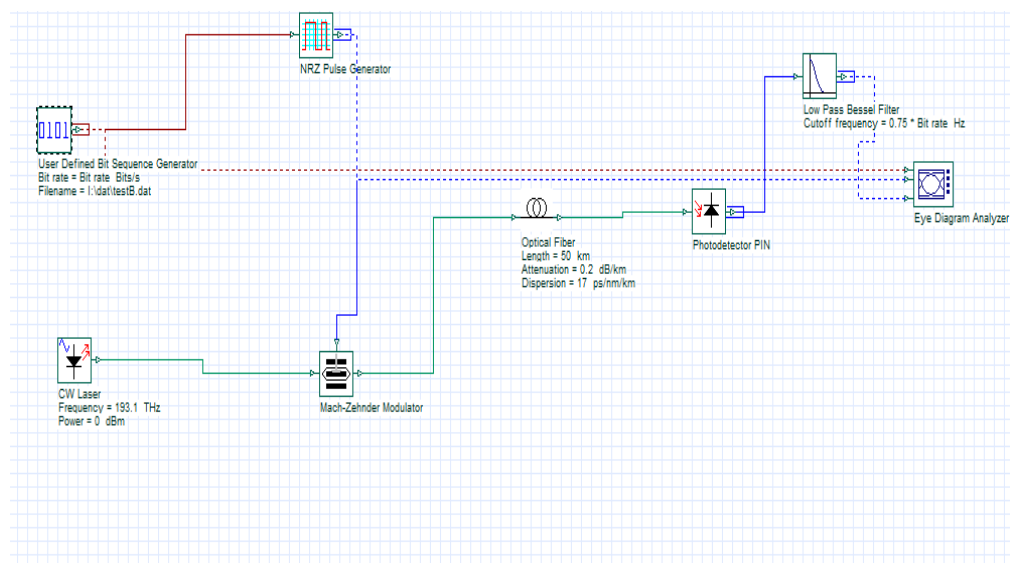


Figure 4.6 Schéma de base d'une liaison optique

4.7.2 Analyse de la Performance à 10 Gbps

La qualité de transmission dans la liaison simulée est fortement influencée par la longueur de la fibre optique. La figure 4.7 illustre comment le facteur Q et le BER varient en fonction de la longueur de la fibre optique pour un débit de 10 Gbps. Conformément aux attentes, le facteur Q décroît de manière significative avec l'augmentation de la distance, passant de plus de 34 dB à 10 km à environ 12.7 dB à 50 km, puis chutant brutalement en dessous de 4 dB au-delà de 70 km. Cette dégradation s'explique principalement par l'effet cumulé de l'atténuation du signal et de la dispersion chromatique qui élargit les impulsions optiques au fil de la propagation. Il a été démontré [180] que le facteur Q décroît fortement avec l'augmentation de la longueur de fibre, atteignant des valeurs proches de 3.7 à 6 pour des distances de 70 à 80 km à 10 Gbps,

tandis que le BER augmente significativement, illustrant l'impact direct de ces deux phénomènes physiques sur la qualité du signal. La performance du système, mesurée par le facteur Q et le BER, dépend donc étroitement de la longueur de la fibre, de l'atténuation et de la dispersion, ce qui confirme l'observation d'une dégradation rapide au-delà de 50 km [180].

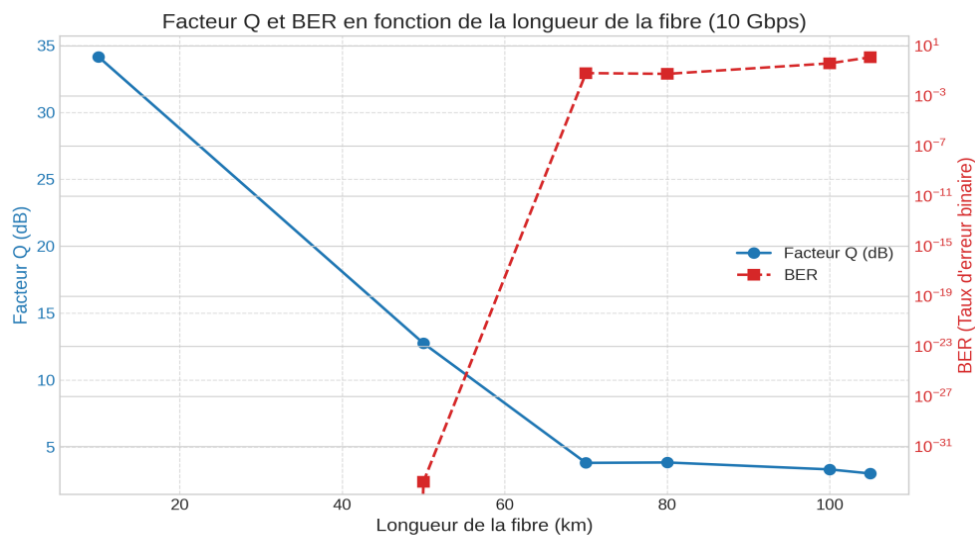
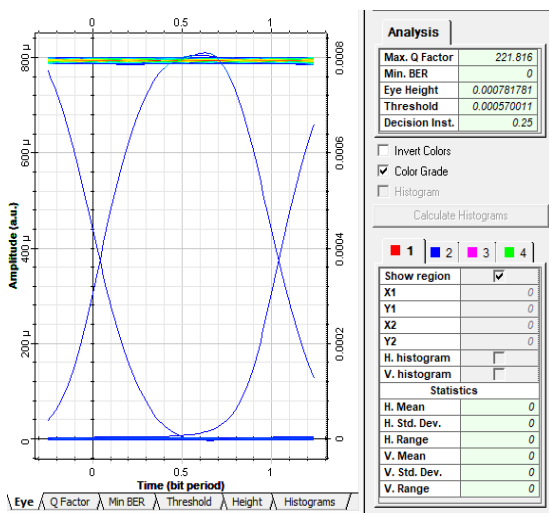


Figure 4.7 Influence de la longueur de la fibre optique sur le BER et Q

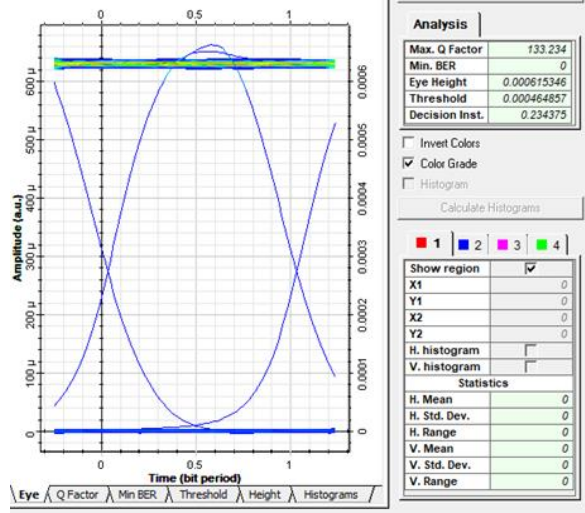
Par conséquent, le BER augmente avec la distance. Pour des longueurs allant jusqu'à 50 km, le BER demeure extrêmement faible (inférieur à 10^{-30}), indiquant une transmission de très haute qualité. Cependant, au-delà de 50 km, le BER augmente de manière exponentielle. A 70 km, le BER atteint environ $6,6 \times 10^{-2}$, ce qui est inacceptable pour la plupart des systèmes de communication. L'augmentation modérée du Q factor et la baisse du BER entre 70 et 80 km semblent contre-intuitives et pourraient indiquer une instabilité dans la simulation ou un artefact lié aux paramètres spécifiques pour ces points. La valeur de BER à 105 km (1.225) confirme une dégradation totale du signal.

Ces résultats montrent que pour une transmission à 10 Gbps dans cette configuration simple, la limite de distance sans amplification ni compensation de dispersion se situe autour de 50-60 km pour maintenir un BER acceptable (typiquement inférieur à 10^{-9} ou 10^{-12}).

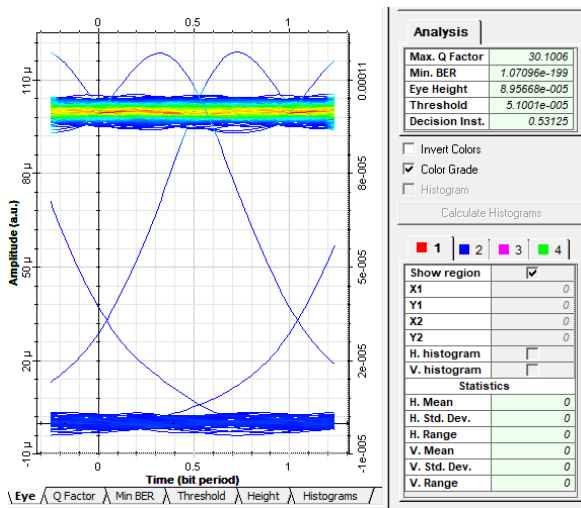
Sachant que le diagramme de l'œil est un outil standard et puissant pour évaluer qualitativement et quantitativement les performances d'un système de communication numérique. La figure 4.8 illustre l'étude de l'impact de la distance et du débit qui est fondamentale pour comprendre les limitations des systèmes de transmission par fibre optique.



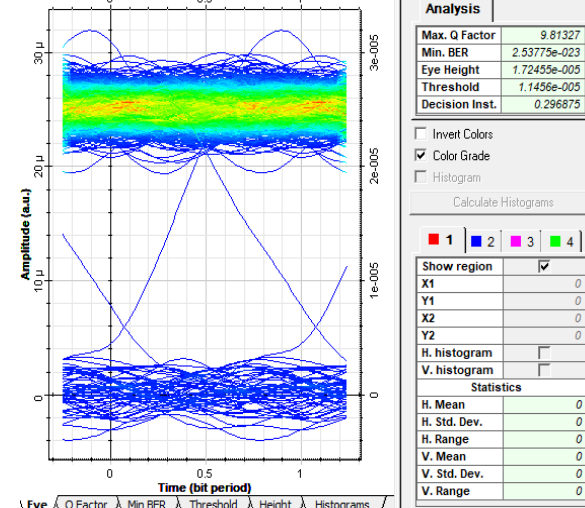
L=5Km



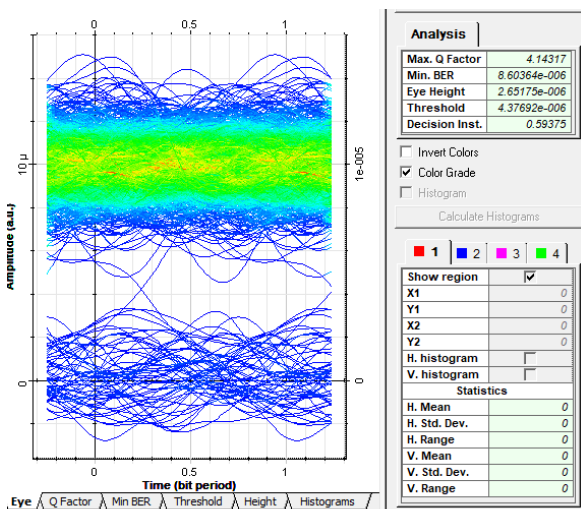
L=10 Km



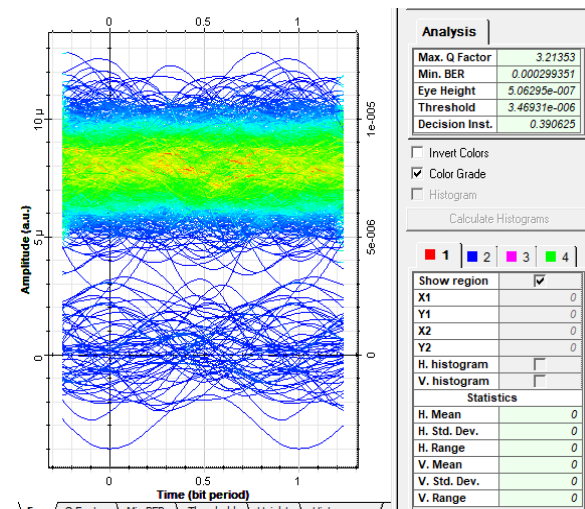
L=50Km



L=80 Km



L=100Km



L=105 Km

Figure 4.8 Les diagrammes de l'oeil en fonction de la distance de SMF pour un débit de 10 Gb

4.7.3 Impact du Débit Binaire sur le Facteur Q

La figure 4.9 compare l'évolution du facteur Q en fonction de la longueur pour les trois débits binaires étudiés (10, 40 et 100 Gbps). On observe clairement que l'accroissement du débit binaire entraîne une dégradation considérable du facteur Q pour une longueur de fibre donnée.

- A 10 Gbps, Q demeure élevé sur plusieurs dizaines de kilomètres.
- A 40 Gbps, Q initial (à 5 km) est déjà nettement plus faible (environ 41 dB) et diminue rapidement, atteignant autour de 11 dB à 50 km et seulement 4.65 dB à 80 km.
- A 100 Gbps, la performance est de plus en plus dégradée. Le facteur Q est inférieur à 16 dB dès 5 km et baisse à environ 7.7 dB à 50 km. A 80 km, le facteur Q est nul, signalant une absence totale de signal identifiable.

Cette dégradation accélérée à des débits plus élevés est due à la susceptibilité accrue aux effets de la dispersion chromatique et potentiellement à d'autres effets non linéaires (bien que moins probables dans une chaîne simple). Des impulsions plus courtes (associées à des débits plus élevés) subissent davantage l'élargissement temporel dû à la dispersion. Il a été démontré que la valeur du facteur Q diminue à mesure que le débit binaire augmente, en raison de la dispersion chromatique qui limite la performance des systèmes optiques à haut débit [181].

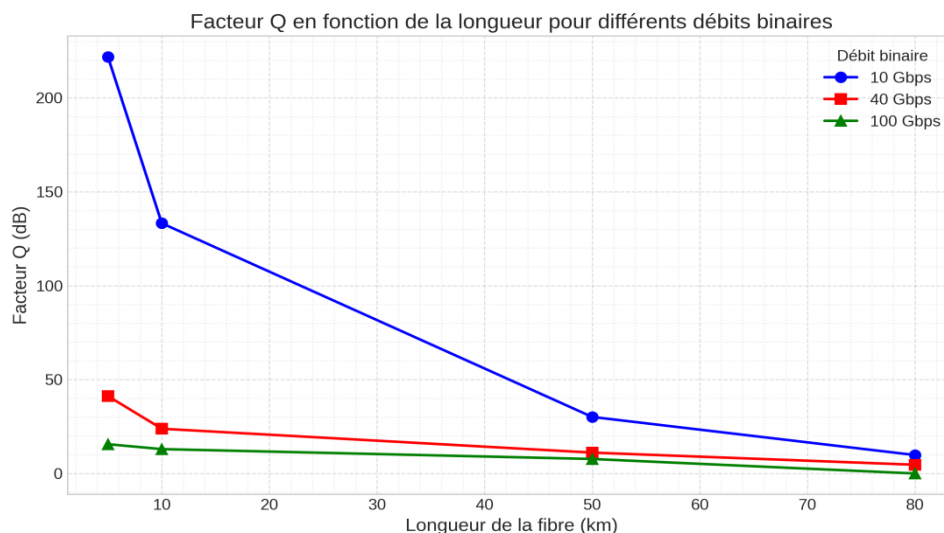


Figure 4.9 Influence du débit sur le facteur Q

4.7.4 Impact du Débit Binaire sur le BER

L'impact de la longueur de la fibre sur le BER, pour plusieurs débits, est illustré dans la figure 4.10. Le BER est tracé en échelle logarithmique pour permettre une lecture précise des très faibles valeurs. Des seuils de référence utilisés dans les systèmes de communication optique, tels que (10^{-9} ou 10^{-12} .) sont affichés afin de situer les performances obtenues par rapport aux exigences classiques de fiabilité.

- Pour 10 Gbps, le BER demeure largement en dessous des seuils acceptables jusqu'à une distance de 50 km. La transmission est limitée au-delà de 60-70 km sans systèmes de correction d'erreur (FEC).
- A 40 Gbps, le BER grimpe beaucoup plus rapidement. Il franchit le seuil de 10^{-12} avant d'atteindre 50 km et le seuil de 10^{-9} autour de 70 km. La transmission à 80 km ($BER \sim 7,4 \times 10^{-5}$) nécessiterait une FEC très performante.

- Compte à une capacité de 100 Gbps, la performance est sévèrement restreinte. Le BER est déjà élevé à 50 km (environ 3×10^{-14} , proche du seuil de 10^{-12}) et la transmission échoue totalement à 80 km (BER = 0, Q = 0).

Ces courbes montrent que l'augmentation du taux de transmission réduit significativement la portée atteignable sans amplification ou compensation des dégradations du signal. Dans cette configuration basique, la transmission à 100 Gbps sur une distance de 80 km est irréalisable.

Cette constatation est validée par de nombreuses recherches : il a été prouvé que débit binaire maximal possible chute considérablement en fonction de la distance de transmission, surtout sans l'utilisation de techniques avancées de compensation ou d'amplification [182]. Par exemple, des simulations indiquent qu'à 100 Gbps, la portée de transmission sans compensation est sévèrement restreinte, et que pour atteindre de longues distances, des systèmes de correction d'erreurs ou de modulation doivent être employés [182]. En outre, des recherches pratiques démontrent que des débits élevés, tels que 30 ou 32 Gbps, peuvent être transmis sur une distance de 100 à 200 km uniquement par le biais de méthodes particulières de modulation ou de compensation. Cela met en évidence la complexité de transmettre à 100 Gbps sur une distance de 80 km sans équipements additionnels [183] [184].

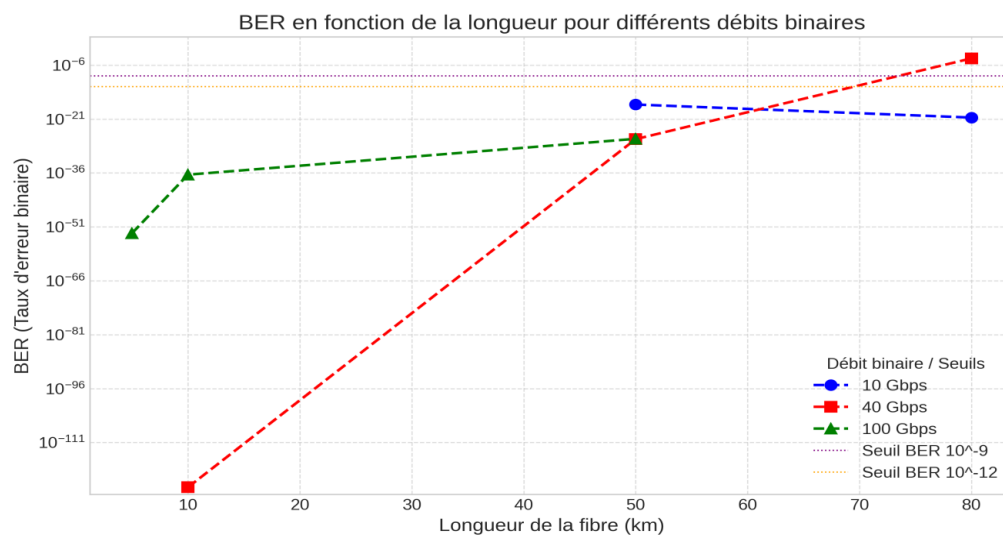
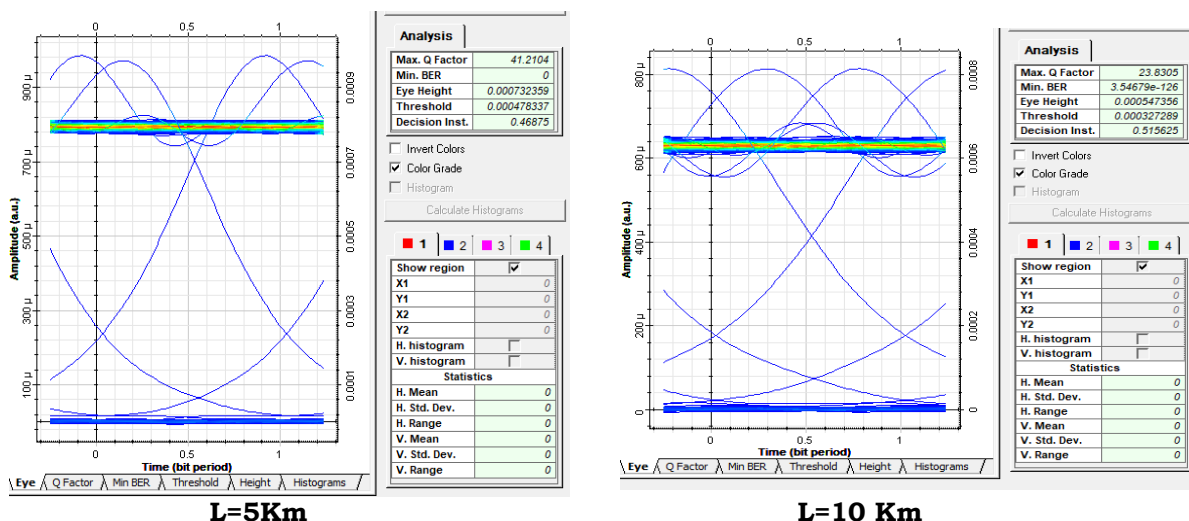


Figure 4.10 Influence du débit sur le facteur BER



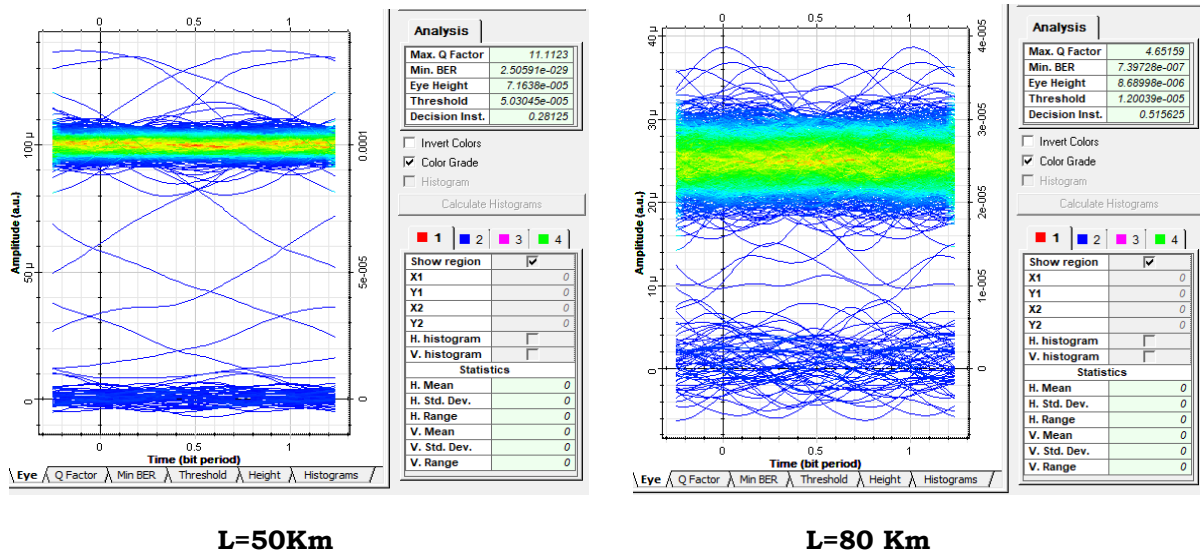


Figure 4.11 Les diagrammes de l'œil en fonction de la distance de SMF pour un débit de 40 Gb

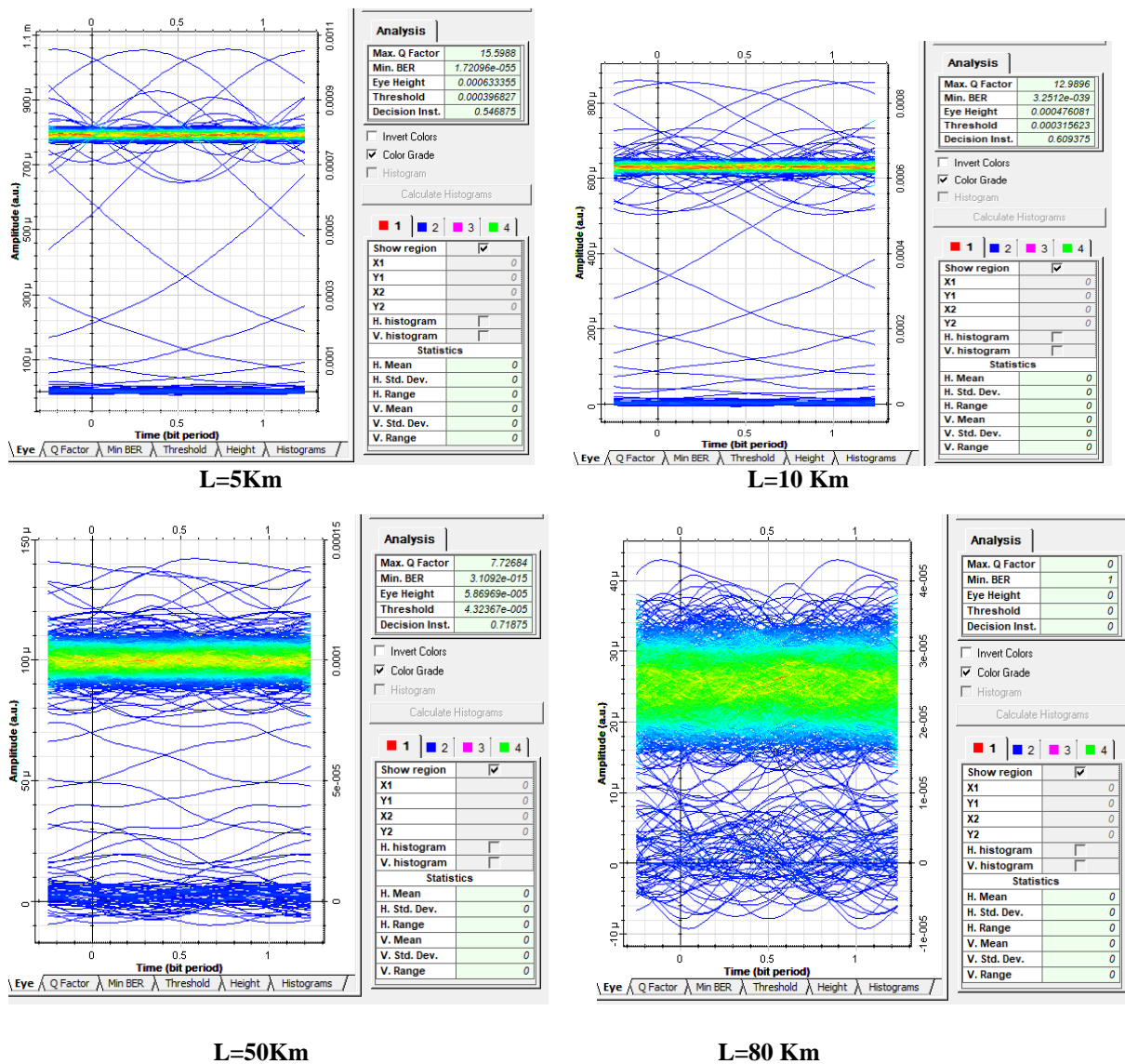


Figure 4.12 Les diagrammes de l'œil en fonction de la distance de SMF pour un débit de 100 Gb

4.7.5 Evaluation de la Chaîne de Transmission Optique Simple

Les résultats de la simulation soulignent les contraintes physiques d'une connexion optique simple, dépourvue d'amplification ou de compensation de dispersion.

L'analyse des diagrammes de l'œil révèle une détérioration graduelle de la qualité du signal en fonction de l'augmentation de la distance ou du débit. Pour un débit spécifique, l'ouverture de l'œil diminue avec la longueur de la fibre, indiquant une augmentation du bruit et du jitter. À l'inverse, pour une distance constante, des débits supérieurs provoquent une fermeture de l'œil plus prononcée, indiquant une sensibilité supérieure à la dispersion.

Cette double exigence en matière de distance et de débit se manifeste également par la dégradation rapide du facteur Q et du BER, qui s'altèrent considérablement au-delà de 50 à 60 km pour un débit de 10 Gbps, et encore plus vite pour des taux de transmission de 40 ou 100 Gbps. Ces restrictions correspondent au comportement prévu d'une fibre SMF non assistée : l'atténuation diminue la force du signal, tandis que la dispersion chromatique étend les impulsions optiques et génère des interférences entre symboles.

Ces observations soulignent la nécessité d'utiliser des amplificateurs optiques (EDFA) pour compenser les pertes, et des modules de compensation de dispersion (DCF ou réseaux de Bragg) pour maintenir une bonne qualité de transmission à haut débit ou sur longue distance. La configuration étudiée, bien que simplifiée, constitue une base de référence essentielle pour comprendre ces contraintes fondamentales et justifier l'adoption de techniques avancées dans les réseaux optiques modernes.

4. 8 Influence combinée du CRF et des conditions de la liaison optique

4.8.1 interprétation des observations, limites de l'étude

Face à l'augmentation du trafic vidéo, l'optimisation conjointe de la compression et de la transmission optique est essentielle. Il faut équilibrer la qualité vidéo perçue et les contraintes techniques des réseaux. L'étude [165] analyse spécifiquement l'interaction entre le paramètre de compression CRF (HEVC) et les performances de la fibre optique. Elle examine à la fois l'optimisation de la compression et les limites physiques de la transmission. Cette approche intégrée ouvre la voie à des stratégies globales, adaptant la compression aux caractéristiques du canal. L'analyse porte sur l'efficacité du CRF, l'impact de la distance, le lien compression-transmission et les limites de l'étude [165].

4.8.2 Analyse de l'efficacité du CRF comme outil de compromis qualité-débit

Le CRF est un paramètre clé des encodeurs vidéo modernes comme HEVC. Il cible une qualité perceptuelle constante, allouant le débit dynamiquement selon la complexité des scènes. Cette approche offre un meilleur compromis qualité/compression. Notre étude confirme que ce paramètre permet un contrôle flexible et précis de la qualité et du débit. Cette flexibilité est majeure pour adapter les flux vidéo aux contraintes du canal de transmission. Le module Varier module significativement le débit tout en contrôlant la dégradation de qualité. Cette relation non linéaire aide à optimiser l'utilisation de la bande passante, puisqu'il réduit intelligemment la taille des fichiers en préservant une qualité acceptable. Son impact varie cependant selon la complexité du contenu vidéo (mouvements, textures). Ce qui souligne l'importance d'une sélection adaptative.

4.8.3 Impact de la longueur de la fibre comme facteur limitant

Les simulations de liaisons optiques montrent une dégradation rapide du signal avec la distance. Le facteur de qualité (Q-factor) diminue et le taux d'erreur binaire (BER) augmente. Ces effets sont dus à la dispersion chromatique et à l'atténuation dans la fibre. Pour une

liaison simple à 10 Gbps sans compensation, la portée est limitée. La transmission fiable ne dépasse guère 50 à 60 kilomètres. Ceci représente une contrainte majeure pour les réseaux longue distance. La dégradation du signal n'est pas linéaire et s'accélère fortement après un certain seuil. Cet "effet de falaise" complique la conception de systèmes robustes. Une planification minutieuse des infrastructures est donc importante. Il faut considérer à la fois le débit et la distance à couvrir. L'étude souligne aussi le besoin de technologies d'amélioration du signal. Amplification et compensation de dispersion sont nécessaires pour les plus longues distances.

4.8.4 Relation entre compression vidéo et performance de transmission

L'un des aspects les plus novateurs de notre étude réside dans son approche intégrative, visant à explorer les interactions entre les paramètres de compression vidéo et les performances des systèmes de transmission optique. Bien que cette relation ne soit pas explicitement quantifiée par des résultats croisés dans l'article, on parvient à établir des connexions conceptuelles significatives entre ces deux domaines technologiques généralement étudiés séparément.

La conclusion logique qui émerge de cette analyse est que la réduction du débit binaire vidéo, obtenue via l'augmentation du paramètre CRF, peut contribuer substantiellement à l'économie de bande passante dans les systèmes de transmission. Cette observation revêt une importance particulière dans les scénarios où la capacité du canal constitue une contrainte opérationnelle majeure. Par exemple, lorsque plusieurs flux vidéo doivent partager simultanément la même infrastructure de fibre optique, l'optimisation individuelle de chaque flux par un ajustement judicieux du CRF peut permettre d'accommoder un nombre plus important de transmissions concurrentes sans compromettre excessivement la qualité perçue par les utilisateurs finaux.

De même, dans les contextes où la qualité du canal de transmission est médiocre, notamment en raison de distances importantes ou de conditions environnementales défavorables, la réduction préventive du débit source peut s'avérer bénéfique. En effet, un flux vidéo plus léger, résultant d'un CRF plus élevé, impose des contraintes moins sévères sur le système de transmission, potentiellement réduisant ainsi la probabilité d'erreurs de transmission et améliorant la robustesse globale du système.

Cependant, il convient de noter que l'article ne démontre pas directement si un flux vidéo à plus faible débit (obtenu avec un CRF élevé) présente effectivement de meilleures performances, en termes de BER ou de Q-factor après transmission, qu'un flux à plus haut débit (résultant d'un CRF bas) sur une même liaison optique opérant à 10 Gbps. Cette limitation analytique s'explique par le fait que, dans le cadre étudié, la performance de la transmission à 10 Gbps est principalement déterminée par les caractéristiques intrinsèques de la liaison elle-même pour ce débit de ligne spécifique, indépendamment du contenu réel des bits transmis, tant que ceux-ci occupent pleinement la capacité disponible.

Cette observation soulève une question fondamentale concernant l'optimisation conjointe des systèmes de compression et de transmission : dans quelle mesure les caractéristiques statistiques du flux de données compressé influencent-elles la robustesse de la transmission sur fibre optique ? Bien que l'étude n'apporte pas de réponse définitive à cette interrogation, elle ouvre la voie à des investigations futures sur ce sujet complexe mais potentiellement fructueux.

4.9 Conclusion

L'analyse menée met en évidence la relation entre compression vidéo et transmission optique, en soulignant deux axes essentiels. D'abord, le facteur CRF (Constant Rate Factor) apparaît comme un outil stratégique pour équilibrer débit binaire et qualité visuelle. Sa capacité à ajuster dynamiquement la compression selon la complexité du contenu permet une utilisation

efficace de la bande passante, ce qui est crucial dans un contexte de forte croissance du trafic vidéo. Ensuite, l'étude révèle que la longueur de la fibre optique constitue un facteur limitant majeur dans les systèmes de transmission sans amplification ni compensation. A mesure que la distance augmente, la dégradation du facteur Q et la hausse du taux d'erreur binaire (BER) deviennent significatives, en raison de l'atténuation et de la dispersion chromatique. Même si l'étude ne propose pas de corrélation quantitative directe entre les paramètres de compression et les performances optiques, elle suggère qu'une réduction du débit binaire via un CRF plus élevé peut améliorer l'efficacité globale du système, notamment lorsque plusieurs flux doivent coexister sur un même canal. Toutefois, certaines limites méthodologiques sont identifiées, comme l'absence d'analyse conjointe CRF-transmission et l'utilisation unique du PSNR comme indicateur de qualité. Ces constats ouvrent des perspectives de recherche intéressantes, notamment l'intégration de mécanismes d'adaptation dynamique du CRF en fonction des conditions de la liaison optique, l'exploration de codages source-canal optimisés, ainsi que la mise en place de cadres d'évaluation de bout en bout plus représentatifs des scénarios réels de transmission vidéo sur fibre optique.

Conclusion générale

Conclusion

La croissance rapide du trafic mondial des données est principalement due à l'usage intensif de contenus vidéo comme la haute définition, les visioconférences et la réalité virtuelle. Ces applications exigent des vitesses de transmission très élevées et consomment une grande quantité de bande passante, ce qui exerce une pression continue sur les infrastructures de télécommunication. La fibre optique s'impose comme la technologie centrale pour répondre à cette demande, grâce à sa capacité quasi illimitée, sa faible atténuation et sa résistance aux interférences. Elle constitue la base des réseaux d'accès, métropolitains et longue distance. Toutefois, ses performances techniques ne suffisent plus à répondre durablement à l'augmentation constante du trafic. Il devient donc nécessaire d'optimiser l'utilisation de la bande passante afin de limiter les coûts liés à l'expansion et à la maintenance des réseaux.

C'est dans ce cadre économique et technologique exigeant que s'inscrit cette thèse. La question principale traitée concerne l'optimisation efficace de la bande passante lors de la transmission de flux vidéo, encodé selon le standard H.265/HEVC, via des connexions par fibre optique.

Nous avons entamé notre travail en premier lieu par présenter les bases théoriques des systèmes de transmission optique dédiés à la vidéo et détailler les méthodes, les composants physiques et les principes techniques assurant une diffusion efficace des signaux vidéo sur fibre optique. Ensuite, étudier l'impact des encodeurs vidéo sur la consommation de bande passante. Analyser le lien entre compression et volume de données, en soulignant l'importance de choisir un codage adapté aux capacités du réseau pour maintenir une qualité de service satisfaisante. Après, analyser les performances des systèmes optiques utilisés pour la transmission de flux vidéo. S'appuyer sur des co-simulations réalisées avec Matlab et OptiSystem pour examiner différentes configurations et identifier les paramètres influençant la qualité de transmission. L'étude met en évidence la nécessité de concilier efficacité du codage, optimisation de la bande passante et limites physiques du réseau optique pour garantir une diffusion fluide et stable des contenus vidéo.

Cette thèse vise à explorer l'interaction entre le codage vidéo HEVC et la transmission optique, afin d'optimiser conjointement leur performance. L'objectif est d'améliorer l'efficacité spectrale et la fiabilité du système. Pour cela, une démarche progressive a été adoptée, articulée autour de deux études complémentaires ayant abouti à des publications scientifiques.

Le premier travail de recherche a proposé une méthode avancée d'optimisation conjointe en améliorant l'intra-prédiction du codage HEVC, combinée à un système de transmission optique performant basé sur le multiplexage temporel (OTDM) et la modulation DPSK. Les résultats de simulation ont montré un gain notable en termes de performance globale. Le second travail s'est penché sur les contraintes fondamentales du système, en analysant l'impact du facteur de qualité CRF sur la compression vidéo et l'effet de la distance sur une liaison optique simple. Cette étude a permis d'identifier les paramètres critiques à considérer et a souligné la nécessité d'une approche plus intégrée et cohérente pour une optimisation efficace.

Cette conclusion résume les contributions clés, leurs impacts scientifiques et pratiques, et ouvre des pistes de recherche pour faire avancer la transmission vidéo sur réseaux optiques.

Notre étude a débuté par l'évaluation d'une méthode d'optimisation conjointe. Nous avons d'abord amélioré le codage HEVC en ciblant précisément l'intra-prédiction. Avec Matlab, nous avons optimisé le choix des modes et des tailles des unités de prédiction, réduisant ainsi la redondance spatiale et le taux de bits tout en maintenant la qualité visuelle. Parallèlement, nous avons développé un système de transmission optique avancé basé sur le multiplexage OTDM et la modulation DPSK. Cette approche vise à maximiser l'efficacité spectrale et à renforcer la résistance aux perturbations du canal.

L'étape clé a été de combiner les deux optimisations : les flux vidéo optimisés par l'intra-prédiction HEVC ont été transmis via notre système OTDM-DPSK simulé avec OptiSystem. Les résultats ont montré que cette optimisation du flux vidéo améliore nettement les performances de transmission optique, avec un meilleur facteur de qualité et un taux d'erreur binaire réduit. Cette simulation confirme l'efficacité d'une stratégie conjointe source-canal, où un codage vidéo précis renforce la qualité et la fiabilité sur un réseau optique performant.

La seconde phase a posé les bases pour mieux comprendre le système. Nous avons étudié en détail le rôle du Constant Rate Factor (CRF) dans l'encodeur HEVC. Nos résultats ont montré que ce paramètre permet d'ajuster efficacement le compromis entre qualité visuelle, mesurée par le PSNR, et débit binaire. Un réglage approprié du CRF aide à adapter le flux vidéo aux contraintes de bande passante, mais il doit être choisi avec soin pour préserver la qualité souhaitée.

Nous avons également analysé les limites d'une liaison optique simple à 10 Gbps, sans amplification ni compensation avancée. Les simulations OptiSystem ont montré que la distance dégrade rapidement les performances, avec une baisse du facteur de qualité et une hausse exponentielle du taux d'erreur binaire, causées par la dispersion chromatique et l'atténuation. Pour cette configuration spécifique, nous avons établi une limite de portée pratique d'environ 50 à 60 kilomètres, mettant ainsi en évidence les difficultés liées aux transmissions sur de longues distances. Cette analyse a mis en relief deux éléments, la compression HEVC via CRF et la transmission optique simple. Elle a montré les limites d'une optimisation traitée de manière séparée et trop simplifiée. Elle souligne l'urgence de développer des stratégies d'amélioration conjointe source codage.

Perspectives Futures

Les travaux de cette thèse confirment l'intérêt de l'optimisation conjointe et ouvrent la voie à de nouvelles perspectives de recherche pour améliorer les performances des transmissions vidéo sur fibre optique. Ces pistes peuvent être explorées selon plusieurs axes complémentaires.

Un premier axe de recherche consiste à étendre l'étude à des systèmes optiques plus avancés pour évaluer leur interaction avec des flux vidéo HEVC optimisés. Au-delà de la liaison simple et du système OTDM-DPSK explorés, il serait pertinent de tester l'approche conjointe avec des technologies comme le multiplexage en longueurs d'onde (WDM) dense, les modulations d'ordre supérieur (QAM) ou la transmission cohérente avec traitement numérique du signal (DSP). Il est aussi important d'analyser l'effet des imperfections réelles des composants optiques, telles que les non-linéarités de la fibre, le bruit des amplificateurs

ou les limites des modulateurs et démodulateurs. L'intégration de codes correcteurs d'erreurs avancés, comme les LDPC ou les codes polaires, mérite également une attention particulière, notamment pour étudier leur complémentarité ou leurs interactions avec les mécanismes de résilience déjà présents dans le codage HEVC

Le second axe de recherche porte sur l'amélioration des méthodes d'optimisation à l'intérieur de l'encodeur HEVC. Notre étude s'est limitée au CRF et à l'intra-prédiction, mais il serait utile d'examiner l'ensemble des outils de codage, comme l'inter-prédiction (mouvement), les filtres adaptatifs (deblocking, SAO) et les structures GOP. L'analyse de leur interaction avec les contraintes du canal optique, telles que les erreurs, la latence ou la gigue, permettrait de concevoir des stratégies d'encodage plus robustes. Une piste prometteuse serait le développement d'encodeurs adaptatifs capables d'ajuster en temps réel les paramètres de compression selon les conditions du canal ou la nature du contenu vidéo. Ces ajustements dynamiques pourraient concerner le CRF, la quantification ou les modes de prédiction. L'ajout de métriques de qualité perceptuelle plus avancées, comme VMAF ou des indicateurs issus de l'apprentissage automatique, renforcerait cette adaptation. Cela permettrait d'optimiser la qualité perçue tout en maîtrisant l'usage des ressources réseau.

Le troisième axe vise la validation expérimentale et l'application concrète des résultats. Mettre en place des bancs d'essai réels avec encodeurs HEVC matériels ou logiciels et des équipements optiques physiques est essentiel pour mesurer l'efficacité réelle de l'optimisation conjointe hors simulation. Le développement de prototypes fonctionnels et leur test sur des réseaux optiques existants ou des plateformes à grande échelle permettrait d'évaluer la robustesse des solutions dans des environnements complexes. Il serait aussi pertinent d'étudier leur adaptation à des cas d'usage spécifiques comme le streaming en direct à faible latence, la vidéo à la demande sur réseaux FTTH, ou le cloud gaming basé sur fibre optique

Des pistes de recherche émergentes méritent une attention particulière. L'intelligence artificielle, en particulier l'apprentissage automatique, offre des possibilités pour rendre l'optimisation conjointe source-canal plus intelligente et réactive. Des algorithmes de type apprentissage par renforcement pourraient ajuster en temps réel les paramètres de compression et de transmission selon l'état du réseau et la qualité requise. Il serait aussi pertinent d'intégrer des aspects comme la sécurité du flux vidéo via un chiffrement adapté, ou la réduction de la latence de bout en bout, dans une stratégie d'optimisation globale. Ces enjeux sont essentiels pour répondre aux exigences des futures applications. Ce champ à la croisée du codage vidéo, des réseaux optiques et de l'IA offre un fort potentiel d'innovation. Les travaux à venir dans cette direction permettront d'améliorer à la fois la qualité, la sécurité et l'efficacité des transmissions vidéo.

Liste des publications

1. Revues internationales :

- Nadira Boukhatem, Kamel Messaoudi, Abdelghani Redjati, 'Analysis of the Compressed Video with HEVC Under Optical Link Transmission', Applied Computer Systems journal, Vol. 29, N°1, pp. 53-58, Juin 2024.
DOI : 10.2478/acss-2024-0007
Site internet : <https://sciendo.com/fr/article/10.2478/acss-2024-0007>
- Nadira Boukhatem, Kamel Messaoudi, Abdelghani Redjati, Abderraouf Fares, Fatima Brik, 'Assessment of Optimization Parameters for Video Transmission over Optical Fiber using an H265/HEVC Encoder in Video Streaming Applications', JOURNAL OF NANO- AND ELECTRONIC PHYSICS, Vol. 16 No 3, 03027(7pp) (2024). ISSN: 2077-6772 (Print), e-ISSN: 2306-4277 (Online).
DOI : [https://doi.org/10.21272/jnep.16\(3\).03027](https://doi.org/10.21272/jnep.16(3).03027)
Site internet : https://jnep.sumdu.edu.ua/en/full_article/3895

2. Book Chapter :

3. Conférences Internationales:

- **Boukhatem nadira**, Messaoudi Kamel, Brik Fatima, 'Error propagation analysis for the HEVC video codec in an optical fiber video transmission', 2nd International Conference on Modern Electrical Engineering and Technology (ICMEET'24), December 13th – 14th, Souk-Ahras, Algeria, 2024.
- **Nadira BOUKHATEM**, Kamel MESSAOUDI, Abdelghani Redjati, Amani NASRI, Abderraouf FARES, 'Co-simulation of Optical Video Transmission System using Matlab and Optisystem', 5th International Conference on Embedded Systems in Telecommunications and Instrumentation (ICESTI2022), Annaba, Algérie, November, 2022.
- **Boukhatem Nadira**, Salah Toumi, El-Bey Bourennane, Abdelghani Redjati, and Abderraouf Fares. 'Simulation Study of Video Transmission by Optical Fiber', In Conference on Innovative Trends in Computer Science. 2589, CITSC, pp. 20-26, Guelma, Algérie, November, 2019.
- **Nadira BOUKHATEM**, Salah TOUMI, El-Bey BOURENNANE, Abdelghani REDJATI, Abderraouf FARES, 'Investigation of Video Transmission by Fiber Optics', 4th International Conference on Embedded System in Telecommunications and Instrumentation (ICESTI2019), October 28–30, Annaba, Algérie, 2019.
- A. Fares, K. Saouchi, F. Brik, M. O. Saouchi and **N. Boukhatem**, '60 GHz RoF-WDM System Performance For Multiservice Long distance Networks', 4th International Conference on Embedded Systems in Telecommunications and Instrumentation (ICESTI2019), Annaba, Algérie, November, 2019.
- A. Fares, K. Saouchi, F. Brik, M. O. Saouchi and **N. Boukhatem**, '60 GHz RoF-WDM System Using DPSK Modulation and Optical DSB-SC for Long distance Networks', 2nd International Conference on Electronics and Electrical Engineering IC3E20, November 16th, Bouira, Algeria, 2020
- A. Fares, K. Saouchi, F. Brik and **N. Boukhatem**, '8x30 Gbps RZ-RoF-WDM System Using Optical DSB-SC For Long-Distance Networks', 2022 19th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD), Sétif, Algeria, 2022, pp. 274-279, doi: 10.1109/SSD54932.2022.9955776.
- A. Fares, K. Saouchi, F. Brik, M. O. Saouchi and **N. Boukhatem**, 'Performance of 60 GHz DPSK-RoF-WDM System Using Optical DSB-SC for Long Distance Networks', 2021 IEEE 1st International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering MI-STA, Tripoli, Libya, 2021, pp. 695-699, doi: 10.1109/MI-STA52233.2021.9464398.
- Abdellatif BOUZID-DAHO, **Nadira BOUKHATEM**, Mohamed BOUGHAZI, Salah TOUMI, 'Automated Detection of Abnormal Blood Cells by Clustering Method using Fuzzy C-Mean', 4th International Conference on Embedded System in Telecommunications and Instrumentation (ICESTI2019), October 28–30, Annaba, Algérie, 2019.

4. Conférences nationales:

- A.Fares, K. Saouchi, F. Brik, M. O. Saouchi and **N. Boukhatem**, 'Performance Evaluation of RoF-WDM System Using DPSK Modulation and Optical DSB-SC for Long-Haul Communications', The National Conference on Security of Identity Data and Communication SIDaC'19. Oum El Bouaghi ,Algeria, 2019.

Références Bibliographiques

- [1] BOULOS, Fadi. "Transmission d'images et de vidéos sur réseaux à pertes de paquets: mécanismes de protection et optimisation de la qualité perçue ". Thèse de doctorat. Université de Nantes.
- [2] HOUSSEIN JABER. CONCEPTION ARCHITECTURALE HAUT DÉBIT ET SÛRE DE FONCTIONNEMENT POUR LES CODES CORRECTEURS D'ERREURS. 2009. Thèse de doctorat. École Polytechnique de Montréal.
- [3] Meraihi, Y. (2016). Qualité de service dans les réseaux sans fil maillés/vanet (Doctoral dissertation, Université M'Hamed Bougara: Faculté des hydrocarbures et de la chimie).
- [4] Ramadan, W., Dedu, E., Dhoutaut, D., & Bourgeois, J. (2013). RELD, RTT ECN Loss Differentiation to optimize the performance of transport protocols on wireless networks. *Telecommunication Systems*, 52(4), 1797-1817.
- [5] Labat-Labourdette, É. (2011). La vidéo-diffusion à la communauté urbaine de Bordeaux.
- [6] Abdallah, A., Meddour, D. E., Ahmed, T., & Boutaba, R. (2010, June). Cross layer optimization architecture for video streaming in WiMAX networks. In *The IEEE symposium on Computers and Communications* (pp. 8-13). IEEE.
- [7] Duret, C. (1987, July). Technique de multiplexage pour réseau optique de vidéocommunication. In *Annales des télécommunications* (Vol. 42, No. 7, pp. 398-403). Paris: Springer-Verlag.
- [8] SOTINDJO, P. C., ETEKA, H., DJOGBE, L., & VIANO, A. (2023). Étude de l'intégration de la radio sur fibre sur le réseau TNT, Bénin. *Afrique SCIENCE*, 23(1), 34-44.
- [9] Sadouki, B. R. (2022). Application des Paquets d'Ondelettes dans les Systèmes MIMO-COFDM (Doctoral dissertation, Université de Sidi Bel Abbès-Djillali Liabes).
- [10] Abdallah, A. B. (2021). Algorithmes d'optimisation inter-couches pour les réseaux de capteurs sans fil multimédia utilisant la technologie Ultra Wide Band (Doctoral dissertation, Conservatoire national des arts et métiers-CNAM; École supérieure des communications de Tunis (Tunisie)).
- [11] Sivarajan, K., Sasaki, G., & Ramaswami, R. (2009). *Optical networks: a practical perspective*. Elsevier.
- [12] FARES, A. (2023). Étude des performances dans les systèmes WDM à fibre optique multiservices à très haut débit.
- [13] Kamli, A. (2019). Analysis and optimization of a new futuristic optical network architecture (Doctoral dissertation, Institut polytechnique de Paris).
- [14] Colnel, J. (2009). Société, information et nouvelles technologies: le cas de la Grande-Bretagne (Doctoral dissertation, Université de la Sorbonne nouvelle-Paris III).
- [15] SOGUT, E., OYUCU, S., ERDEM, O. A., & POLAT, H. (2017). Recommendations for xDSL Technologies and Applications.
- [16] AGOSSOU, M. M. C., DJOGBE, L., SANYA, F., SOTINDJO, P., VIANO, A., & AUPETIT-BERTHELEMOT, C. (2019). Modulation RZ-DPSK optique pour le réseau d'accès optique passif multiplexé en longueurs d'onde (WDM-PON). *Afrique SCIENCE*, 15(4), 96-105.
- [17] NISHIMOTO, H. (2023). Evolution of Video Communication and Sumitomo Electric's Mission. *Sumitomo Electric Technical Review*, (97), 1-8.
- [18] Sawadogo, B. A. (2022). Conception et mise en œuvre d'émetteurs Terahertz multiples via l'association de fibre multi-cœurs et de réseaux de photodiodes: application aux télécommunications à très haut débit (Doctoral dissertation, Université de Lille).
- [19] Sawadogo, B. A. (2022). Conception et mise en œuvre d'émetteurs Terahertz multiples via l'association de fibre multi-cœurs et de réseaux de photodiodes: application aux télécommunications à très haut débit (Doctoral dissertation, Université de Lille).
- [20] Abdellaoui, Z., Dieudonne, Y., & Aleya, A. (2021). Design, implementation and evaluation of a Fiber To The Home (FTTH) access network based on a Giga Passive Optical Network GPON. *Array*, 10, 100058.
- [21] Belabbas, B. E. R. R. A. H. A. L. (2020). Etude et optimisation des caractéristiques optique photonique d'un amplificateur EYDWA pour le réseau optique passif GPON (Doctoral dissertation).

- [22] Sultan, D. M. S., & Arefin, M. T. (2011). GPON, the ultimate pertinent of next generation triple-play bandwidth resolution. *Journal of telecommunications and Information Technology*, (2), 53-60.
- [23] Wey, J. S., & Zhang, J. (2018). Passive optical networks for 5G transport: technology and standards. *Journal of Lightwave Technology*, 37(12), 2830-2837.
- [24] Anfray, T. (2013). Étude et simulation des potentialités du Dual Electroabsorption Modulated Laser (D-EML) pour la montée en débit dans les futurs réseaux d'accès optique (Doctoral dissertation, Limoges).
- [25] Levaufre, G. (2016). Circuits photoniques intégrés incluant des lasers hybrides III-V sur silicium pour applications en télécommunication très haut débit (Doctoral dissertation, Université Paris Saclay (COmUE)).
- [26] Simon, G. (2016). Introduction des technologies de multiplexage en longueur d'onde dense dans les futures générations de réseaux d'accès optique (Doctoral dissertation, Télécom ParisTech).
- [27] Hernández, M., Arcia, A., Alvizu, R., & Huerta, M. (2012, December). A review of XDMA-WDM-PON for next generation optical access networks. In *2012 Global information infrastructure and networking symposium (GIIS)* (pp. 1-6). IEEE.
- [28] Verneuil, J. L. (2003). Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbits/s. Université de Limoges, Limoges, 297.
- [29] Merzouk, K. (2008). Étude d'un système bas coût de transmission optique par multiplexage temporel (Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG).
- [30] Cheikh, K. H. E. R. I. C. I. (2021). Etude comparative des différentes méthodes de multiplexage optique pour les télécommunications (Doctoral dissertation).
- [31] TONYE, E. (2005). Unité de Valeur DTRN401-01 Réseaux de télécommunications et transmission de données.
- [32] Loum, D. S. (2012). Transmission radio haut débit multiservices sur fibres optiques. Application à l'optimisation de la capacité multi-utilisateurs en emprises de transport (Doctoral dissertation, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis).
- [33] BERROUANE, M. W. (2018). Etude de conception d'une chaîne de transmission optique à très haut débit à base de semi-conducteur du type III-Nitrides (Doctoral dissertation, Université de Sidi Bel Abbès-Djillali Liabes).
- [34] Jeurink, S. (2021). Skalierung der Signalmodenanzahl in Erbium-dotierten Faserverstärkern für optische Übertragungssysteme mit Modenmultiplex (Doctoral dissertation, Dissertation, Dortmund, Technische Universität).
- [35] Baraketi, S. (2015). Ingénierie des réseaux optiques SDH et WDM et étude multicouche IP/MPLS sur OTN sur DWDM (Doctoral dissertation, Université Toulouse III Paul Sabatier).
- [36] Aziez, S. (2021). Étude de la Propagation des Solitons Vectoriels dans les Systèmes à Multiplexage Ultrarapide en Longueur d'onde (Doctoral dissertation, UB1).
- [37] Maiman, T. H. (1960). Stimulated optical radiation in ruby. *nature*, 187(4736), 493-494.
- [38] Lai, N. D. (2003). Étude théorique et expérimentale des lasers solides bi-fréquences dans les domaines GHz à THz, en régime continu ou impulsionnel. Applications opto-microondes (Doctoral dissertation, Université Rennes 1).
- [39] Ngo, M. N. (2010). Theoretical and Experimental Studies of Semiconductor Based Photonic Devices for All-Optical Signal Processing at 40 Gbit/s and Beyond (Doctoral dissertation, Université Rennes 1).
- [40] MEDJDOUB, F. (2010). Optimisation par la simulation système d'une chaîne de transmission numérique par fibre optique haut débit. UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID-TLEMCEM.
- [41] Becker, P. M., Olsson, A. A., & Simpson, J. R. (1999). Erbium-doped fiber amplifiers: fundamentals and technology. Elsevier.
- [42] Union internationale des télécommunications. (2019). UIT-R S.1062 : Caractéristiques d'erreur admissibles d'un conduit numérique fictif de référence de satellite fonctionnant au-dessous de 15 GHz.
- [43] Pflueger, M. P. D. (2023). Complex Optical Networks based on Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers (VCSELs).
- [44] Laurent, J. (2004). Communications optiques à très haut débit. Université du CNAM, 3.

- [45] Guerra Altamirano, C. (2021). Parametrización de sistemas multiplexados en longitud de onda mediante herramientas de simulación: desarrollo de prácticas de laboratorio no-presenciales.
- [46] Forget, S. (2007–2008). Cours d'optique instrumentale [Supports de cours en ligne]. wuhan Institute of Technologie.
- [47] Bensafia, B. (2023). Conception et optimisation de la diode laser à l'aide de comsol multiphysics (Doctoral dissertation, Université du Québec à Trois-Rivières).
- [48] Ghafoor, S. (2012). Radio over fiber systems (Doctoral dissertation, University of Southampton).
- [49] Ledentsov, N. N., Makarov, O. Y., Shchukin, V. A., Kalosha, V. P., Ledentsov, N., Chrochos, L., ... & Turkiewicz, J. P. (2022). High speed VCSEL technology and applications. *Journal of Lightwave Technology*, 40(6), 1749-1763.
- [50] Prades, J. (2016). Conception d'un modulateur électro-optique Mach Zehnder 100 Gbits/s NRZ sur silicium (Doctoral dissertation, Université de Bordeaux).
- [51] Mutalip, Z. B. A. (2010, March). Frequency chirp characteristics on WDM direct modulation. In 2010 Second International Conference on Computer Engineering and Applications (Vol. 1, pp. 125-128). IEEE.
- [52] Girondin, V. (2016). Etude et modélisation d'un modulateur à électro-absorption pour des applications de transmission radio sur fibre de signaux ULB aux fréquences centimétriques. Simulation système et caractérisation d'une liaison radio sur fibre à modulation externe (Doctoral dissertation, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI).
- [53] Le Cren, E. (2004). Etude de composants absorbants saturables à semi-conducteurs à multi-puits quantiques dopés au fer pour la régénération de signaux optiques à très hauts débits d'information (Doctoral dissertation, Université Rennes 1).
- [54] Joindot, I. (1996). Les télécommunications par fibres optiques. Dunod.
- [55] Chaciński, M., Westergren, U., Thylen, L., Schatz, R., Li, J., Djupsjöbacka, A., & Stoltz, B. (2010, September). Modulation and chirp evaluation of 100 GHz DFB-TWEAM. In 36th European Conference and Exhibition on Optical Communication (pp. 1-3). IEEE.
- [56] Belabbas, B. E. R. R. A. H. A. L. (2020). Etude et optimisation des caractéristiques optique photonique d'un amplificateur EYDWA pour le réseau optique passif GPON (Doctoral dissertation).
- [57] Vervoort, S., Saalberg, Y., & Wolff, M. (2023, March). Mach-Zehnder Modulator output in time and frequency domain—Calculation and experimental confirmation. In *Photonics* (Vol. 10, No. 3, p. 337). MDPI.
- [58] Jradi, Z. (2022). Nanocomposites à effet électro-optique pour des composants opto-hyperfréquences hautes performances (Doctoral dissertation, Nantes Université).
- [59] Graini, L. (2017). Applications des similaritons dans les systèmes de télécommunications par fibre optique à très haut débit (Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba). Université Badji Mokhtar Annaba.
- [60] Dong, P., Chen, L., & Chen, Y. K. (2012). High-speed low-voltage single-drive push-pull silicon Mach-Zehnder modulators. *Optics express*, 20(6), 6163-6169.
- [61] Lecoy, P. (2009). Communications sur fibres optiques. Hermès science.
- [62] Aji, A., Sabo, K., & Priyadarshini, P. (2017). External optical modulator (EOM), Hochschule Bremen.
- [63] Rhodes, E. W. T., Smith, J., & Doe, A. (2005). High-order modulation for optical fiber transmission. *Journal of Lightwave Technology*, 23, 123–135.
- [64] Deniel, L. (2021). Composants électro-optiques en photonique silicium pour les communications haut-débit et la génération de peignes de fréquences (Doctoral dissertation, Université Paris-Saclay).
- [65] Seimetz, M. (2009). High-order modulation for optical fiber transmission (Vol. 143). Springer.
- [66] Michard, A. (2018). Conception et caractérisation d'un transmetteur électro-optique dans une plateforme photonique sur silicium visant des communications très haut débit (Doctoral dissertation, Université Paris Saclay (COMUE)).
- [67] Ferrari, L. (2010). Ultra-High Speed Signal Generation Combining OTDM and High-Order Modulation Formats (Doctoral dissertation, Master's thesis, Technical University of Denmark).

- [68] Evrard, M. (2023). Étude de nouveaux verres de tellurite du système TeO₂-ZnO-La₂O₃ (TZL) pour la fabrication de fibres optiques multimatériaux et de guides d'ondes spéciaux pour le moyen-infrarouge (Doctoral dissertation, Université Bourgogne Franche-Comté).
- [69] Hecht, J. (2004). City of light: the story of fiber optics. Oxford university press.
- [70] Kader, D. A. (2009). Fibres optiques microstructurées: Modélisation et optimisation des propriétés optiques (Doctoral dissertation).
- [71] Tian, K., Farrell, G., Wang, X., Yang, W., Xin, Y., Liang, H., ... & Wang, P. (2017). Strain sensor based on gourd-shaped single-mode-multimode-single-mode hybrid optical fibre structure. *Optics Express*, 25(16), 18885-18896.
- [72] Nguyen, D. M. (2011). Investigations et caractérisations de fibres et guides optiques très fortement non-linéaires (Doctoral dissertation, Université Rennes 1).
- [73] El Akrmî, S. (2017). Définition & Optimisation des limitations Physiques d'un Système de Transmission Optique & Aspects Réseaux Connexes. (Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba).
- [74] Massoubre, D. (2006). Composant passif à absorbants saturables sur InP pour la régénération tout-optique à très hauts-débits (Doctoral dissertation, Paris 11).
- [75] Murugan, G., Chouhan, K., Kumar, B. V., & Reddy, B. S. (2017). Bandwidth Length and Dispersion Effect in Optical Networks. In National Conference on Contemporary Advancements in Computers, Networks in Machine Learning (NCACNM)-January-2017.
- [76] Boudrioua, N. (2007). Etude et optimisation d'une chaîne de transmission numérique sur fibre optique: vers une compensation électronique de la PMD (Doctoral dissertation).
- [77] Tasgin, M. E. (2021). Negative superluminal velocity and violation of Kramers-Kronig relations in causal optical systems. *Physical Review A*, 103(1), 013504.
- [78] Du Jeu, R. D. M. (2018). Développement d'architectures de fibres structurées pour l'amplification d'impulsions haute puissance crête (Doctoral dissertation, Université de Limoges).
- [79] Baillot, M. (2017). Mélange à quatre ondes multiple pour le traitement tout-optique du signal dans les fibres optiques non linéaires (Doctoral dissertation, Université de Rennes 1).
- [80] Verma, R., & Garg, P. (2013). Qualitative analysis of self phase modulation (SPM). *International Journal of Electronics Communication and Computer Engineering*, 4(2), 330-333.
- [81] Benslama, M., Benslama, A., & Aris, S. (2017). Quantum communications in new telecommunications systems. ISTE.
- [82] Pareit, D., Lannoo, B., Moerman, I., & Demeester, P. (2011). The history of WiMAX: A complete survey of the evolution in certification and standardization for IEEE 802.16 and WiMAX. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 14(4), 1183-1211.
- [83] HADJADJI, N. (2021). Contribution à l'étude des techniques et dispositifs dédiés aux réseaux de télécommunications optiques reconfigurables (Doctoral dissertation).
- [84] Yin, A., Li, L., & Zhang, X. (2009). Analysis of 2.5 Gbit/s GPON downlink optical-receiver performance. *Optics communications*, 282(2), 198-203.
- [85] Vijayan, K., Foo, B., Eliasson, H., & Andrekson, P. A. (2018, September). Cross-phase modulation mitigation in WDM transmission systems using phase-sensitive amplifiers. In 2018 European Conference on Optical Communication (ECOC) (pp. 1-3). IEEE.
- [86] Helán, R., & Mikel, B. (2006, April). Simulation of apodized fiber Bragg gratings. In *Photonics, Devices, and Systems III* (Vol. 6180, pp. 138-143). SPIE.
- [87] Agrawal, G. P. (2000). Nonlinear fiber optics. In *Nonlinear Science at the Dawn of the 21st Century* (pp. 195-211). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [88] Kaur, G., & Patterh, M. S. (2014). Suppression of four wave mixing in wavelength division multiplexed system with hybrid modules. *optik*, 125(15), 3894-3896.
- [89] Le Cren, E. (2004). Etude de composants absorbants saturables à semi-conducteurs à multi-puits quantiques dopés au fer pour la régénération de signaux optiques à très hauts débits d'information (Doctoral dissertation, Université Rennes 1).

- [90] Tyagi, L. K., Jaiswal, A. K., Kumar, M., & Joshi, T. (2012). Performance analysis of four wave mixing based wavelength conversion in commercial optical fibers. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 2(7), 1-5.
- [91] Nagel, J. (2019). *Methods for Managing Stimulated Brillouin Scattering in Narrow Linewidth Fiber Raman Amplifiers*. Ph. D. Thesis.
- [92] Schneider, T. (2013). *Nonlinear optics in telecommunications*. Springer Science & Business Media.
- [93] Rashed, A. N. Z. (2019). Comparison between NRZ/RZ modulation techniques for upgrading long haul optical wireless communication systems. *Journal of Optical Communications*.
- [94] Gnauck, A. H., Raybon, G., Chandrasekhar, S., Leuthold, J., Doerr, C., Stulz, L., & Burrows, E. (2003). 25 x 40-Gb/s copolarized DPSK transmission over 12 x 100-km NZDF with 50-GHz channel spacing. *IEEE photonics technology letters*, 15(3), 467-469.
- [95] Verneuill, J. L. (2003). *Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbits/s*. Université de Limoges, Limoges, 297.
- [96] Qi, Y., Liu, Z., Cong, B., Gong, C., Wang, Y., Wang, N., & Zhang, F. (2021). DPSK modulation and demodulation system based on a novel Mach-Zehnder interference structure. *Optical Fiber Technology*, 64, 102544.
- [97] Ghafoor, S., Afraz, S., Raza, A., & Butt, M. F. U. (2023). Electroabsorption Modulator-Based Relay for the Transmission of DPSK-Modulated Signals over the Free Space Optical Link. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 48(5), 6163-6173.
- [98] Jacobsson, F. (2004). DPSK modulation format for optical communication using FBG demodulator.
- [99] Spasojevic, M. (2013). *Nonlinear optical signal processing and tunable optical delays in silicon-on-insulator waveguides*.
- [100] Boutaleb, N., & Temmar, A. (2012). Contribution de la modulation DPSK dans les systèmes de transmission d'un signal radio sur fibre. *Communication Science et technologie COST*, 11.
- [101] Mostari, L. (2020). *Polycopié de cours et travaux dirigés : Codage de canal [Support de cours]*. Université de Chlef.
- [102] Arévalo, G. (2015). Effectiveness of Grey coding in an AWGN digital channel data transmission. *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología*, (14), 30-34.
- [103] Seimetz, M. (2009). *High-order modulation for optical fiber transmission (Vol. 143)*. Springer.
- [104] Younes, M. (2019). *Techniques de pré-distorsion numérique pour l'optimisation des réseaux d'accès optiques (Doctoral dissertation, Université de Bretagne occidentale-Brest)*.
- [105] Zia-Chahabi, O. (2013). *Techniques de traitement numérique du signal pour les systèmes de transmission optique ultra haut débit à détection cohérente (Doctoral dissertation, Télécom Bretagne, Université de Bretagne-Sud)*.
- [106] Jahangir Alam, S. M., Alam, M. R., Guoqing, H., & Mehrab, M. Z. (2014). Improvement of bit error rate in fiber optic communications. *International Journal of Future Computer and Communication*, 3(4), 281-286.
- [107] Proakis, J. G., & Salehi, M. (2001). *Digital communications (Vol. 4, pp. 593-620)*. New York: McGraw-hill.
- [108] Alhaj, A. H., Bakhit, A. A., & Abdellatif, R. E. (2023). Analysis of Bit Error Rate in Binary Phase Shift Keying Modulation Scheme Using Matlab. *Humanities & Natural Sciences Journal*, 4(3), 125-131.
- [109] Mallikarachchi, T., Talagala, D., Kodikara Arachchi, H., Hewage, C., & Fernando, A. (2020). Un algorithme de codage vidéo à complexité de décodage et débit contrôlés pour HEVC. *Future Internet*, 12(7), 120.
- [110] Kua, J., Armitage, G., & Branch, P. (2017). A survey of rate adaptation techniques for dynamic adaptive streaming over HTTP. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(3), 1842-1866.
- [111] Candela, M., Luconi, V., & Vecchio, A. (2020). Impact of the COVID-19 pandemic on the Internet latency: A large-scale study. *Computer Networks*, 182, 107495
- [112] Barwani, M. M. S. A. (2018). *End to End Multi-Objective Optimisation of H. 264 and HEVC Codecs (Doctoral dissertation, Loughborough University)*.

- [113] Nouripayam, M., & Shekhipoor, N. (2014). HEVC (H. 265) Intra-Frame prediction implementation using MATLAB.
- [114] Sharma, U., Sood, M., & Puthooran, E. (2018). Lossless compression of medical image sequences using a resolution independent predictor and block adaptive encoding. *International journal of electrical and computer engineering systems*, 9(2), 69-79.
- [115] Yang, J., & Wei, A. (2020). Fast mode decision algorithm for intra prediction in HEVC. In *2020 IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC)* (pp. 1018–1022). IEEE.
- [116] Jiang, W., Ma, H., & Chen, Y. (2012). Gradient based fast mode decision algorithm for intra prediction in HEVC. In *2012 2nd International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet)* (pp. 1836–1840). IEEE.
- [117] Shi, W., Jiang, X., Song, T., & Shimamoto, T. (2014, November). Edge information based fast selection algorithm for intra prediction of HEVC. In *2014 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems (APCCAS)* (pp. 17-20). IEEE.
- [118] Na, S., Lee, W., & Yoo, K. (2014, January). Edge-based fast mode decision algorithm for intra prediction in HEVC. In *2014 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)* (pp. 11-14). IEEE.
- [119] Kamath, S. S., Aparna, P., & Antony, A. (2018). Gradient-oriented directional predictor for HEVC planar and angular intra prediction modes to enhance lossless compression. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 95, 73-81.
- [120] El-Mowafy, M. A., Gharghory, S. M., Abo-Elsoud, M. A., Obayya, M., & Allah, M. F. (2022). Efficient mode decision scheme based on edge detection with Gaussian pulse for Intra-prediction in H. 264/AVC. *Alexandria Engineering Journal*, 61(4), 2709-2722.
- [121] Ding, Q., Shen, L., Yu, L., Yang, H., & Xu, M. (2021). Patch-wise spatial-temporal quality enhancement for HEVC compressed video. *IEEE Transactions on Image Processing*, 30, 6459-6472.
- [122] Chirollet, J. C. (2014). *L'Oeil digital de l'art: Les anachronismes numériques*. Connaissances et Savoirs.
- [123] Hamdini, R. (2021). *Reconnaissance d'objets par l'histogramme de couleurs orientées* (Doctoral dissertation, Ph. D, Blida01 University, Blida, Algeria. [http://dx. doi. org/10.13140/RG. 2.2. 22552.72966](http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.22552.72966)).
- [124] Menasri, W. (2019). *Implémentation d'un décodeur CABAC HEVC/H. 265 sur plateforme FPGA* (Doctoral dissertation).
- [125] Parois, R. (2018). *Codeur vidéo scalable haute-fidélité SHVC modulable et parallèle* (Doctoral dissertation, INSA de Rennes).
- [126] ELHACHI, H. (2025). *STUDY AND IMPROVEMENT OF THE QUALITY OF SERVICE OF A VIDEO STREAMING BY THE HEVC CODEC IN AD-HOC NETWORKS* (Doctoral dissertation).
- [127] PERMATA, O. A., & FIELD, M. T. (2016). *IMPLEMENTATION OF HEVC CODEC ON FPGA-BASED PLATFORM*.
- [128] Urban, F. (2007). *Implantation optimisée d'estimateurs de mouvement pour la compression vidéo sur plates-formes hétérogènes multicomposants* (Doctoral dissertation, INSA de Rennes).
- [129] Sze, V., Budagavi, M., & Sullivan, G. J. (2014). High efficiency video coding (HEVC). *Integrated circuit and systems, algorithms and architectures*, 39, 40.
- [130] Man, H. (2019). *Efficient Intra Prediction for the Next-Generation Video Compression Standard*.
- [131] Dhollande, N. (2016). *Optimisation du codage HEVC par des moyens de pré-analyse et/ou de pré-codage du contenu* (Doctoral dissertation, Ecole doctorale Matisse).
- [132] Merlo Serrano, M. (2014). *Improved intra-prediction for video coding* (Bachelor's thesis).
- [133] dos Santos Fernandes, L. C. (2012). *Implementação da Predição Intra HEVC em Processadores Multicore* (Master's thesis, Universidade de Coimbra (Portugal)).
- [134] Deep, V. (2016). *Realization of state-of-the-art intra-prediction in High Efficiency Video Coding (HEVC)*. California State University, Fresno.
- [135] Richardson, I. E. (2011). *The H. 264 advanced video compression standard*. John Wiley & Sons.

- [136] Zheng, A., Yuan, Y., Zhou, J., Guo, Y., Yang, H., & Au, O. C. (2015). Adaptive block coding order for intra prediction in HEVC. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 26(11), 2152-2158.
- [137] Nair, P. S., & Nair, M. S. (2024). KSVM-based fast intra mode prediction in HEVC using statistical features and sparse autoencoder. *IEEE Access*, 12, 48846-48852.
- [138] Alheneidi, H., AlSumait, L., AlSumait, D., & Smith, A. P. (2021). Loneliness and problematic internet use during COVID-19 lock-down. *Behavioral Sciences*, 11(1), 5.
- [139] Kua, J., Armitage, G., & Branch, P. (2017). A survey of rate adaptation techniques for dynamic adaptive streaming over HTTP. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(3), 1842-1866.
- [140] Chang, S. F., & Vetro, A. (2005). Video adaptation: concepts, technologies, and open issues. *Proceedings of the IEEE*, 93(1), 148-158.
- [141] Bellini, A., Del Lungo, A., Gori, F., Grossi, R., & Guarducci, M. (1999, June). A fast H. 261 software codec for high quality videoconferencing on PCs. In *Proceedings IEEE International Conference on Multimedia Computing and Systems (Vol. 2, pp. 1007-1008)*. IEEE.
- [142] François, E., Fogg, C., He, Y., Li, X., Luthra, A., & Segall, A. (2015). High dynamic range and wide color gamut video coding in HEVC: Status and potential future enhancements. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 26(1), 63-75.
- [143] Mercat, A., Viitanen, M., & Vanne, J. (2020, May). UVG dataset: 50/120fps 4K sequences for video codec analysis and development. In *Proceedings of the 11th ACM multimedia systems conference (pp. 297-302)*.
- [144] Kamath, S. S., Aparna, P., & Antony, A. (2018). Gradient-oriented directional predictor for HEVC planar and angular intra prediction modes to enhance lossless compression. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 95, 73-81.
- [145] Shi, W., Jiang, X., Song, T., & Shimamoto, T. (2014, November). Edge information based fast selection algorithm for intra prediction of HEVC. In *2014 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems (APCCAS) (pp. 17-20)*. IEEE.
- [146] El-Mowafy, M. A., Gharghory, S. M., Abo-Elhoud, M. A., Obayya, M., & Allah, M. F. (2022). Efficient mode decision scheme based on edge detection with Gaussian pulse for Intra-prediction in H. 264/AVC. *Alexandria Engineering Journal*, 61(4), 2709-2722.
- [147] Martínez-Rach, M. O., Migallón, H., López-Granado, O., Galiano, V., & Malumbres, M. P. (2021). Performance overview of the latest video coding proposals: HEVC, JEM and VVC. *Journal of Imaging*, 7(2), 39.
- [148] Vlaović, J., Žagar, D., Rimac-Drlje, S., & Vranješ, M. (2021). Evaluation of objective video quality assessment methods on video sequences with different spatial and temporal activity encoded at different spatial resolutions. *International journal of electrical and computer engineering systems*, 12(1), 1-9.
- [149] Chérigui, S., Alain, M., Guillemot, C., Thoreau, D., & Guillotel, P. (2014, October). Epitome inpainting with in-loop residue coding for image compression. In *2014 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP) (pp. 5581-5585)*. IEEE.
- [150] Ebrahimi, T., & Horne, C. (2000). MPEG-4 natural video coding—An overview. *Signal Processing: Image Communication*, 15(4-5), 365-385.
- [151] Gao, X., Li, Z., & Li, D. (2017, October). A fast intra prediction mode decision algorithm for HEVC intra coding of 4K ultra-HD video. In *2017 IEEE 17th International Conference on Communication Technology (ICCT) (pp. 1742-1746)*. IEEE.
- [152] <http://ultravideo.Fi/#testsequence>.
- [153] Sakhare, S. V. (2020). Improving Psnr and processing speed for hevc using hybrid Pso for Intra frame prediction. *The International Journal of Multimedia & Its Applications (IJMA) Vol, 12*.
- [154] Vinolin, L., & Rekh, A. S. (2016). Analysis of High Efficiency Video Coding in YUV Files using Intra Prediction Algorithm. *International Journal of Engineering Research*, 5(03).
- [155] Uhrina, M., Frnda, J., Sevcik, L., & Vaculik, M. (2014). Impact of H. 264/AVC and H. 265/HEVC compression standards on the video quality for 4K resolution. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 12(4), 368.

- [156] Mohsen, D. E., Hammadi, A. M., & Al-Askary, A. J. (2021). WDM and DWDM based RoF system in fiber optic communication systems: a review. *International Journal of Communication Networks and Information Security*, 13(1), 22-32.
- [157] Swamy, T. N., & Ramesha, K. (2022). Improved Intra Prediction Algorithm for HEVC with Conventional and Convolutional Neural Network Approach. *Mathematical Statistician and Engineering Applications*, 71(2), 272-280.
- [158] Cao, H., Atai, J., Zuo, J., Yu, Y., Gbadebo, A., Xiong, B., ... & Shu, X. (2015). Simultaneous multichannel carrier-suppressed return-to-zero to non-return-to-zero format conversion using a fiber Bragg grating. *Applied Optics*, 54(20), 6344-6350.
- [159] Ding, W., Yang, F., Yang, H., Wang, J., Wang, X., Zhang, X., & Song, J. (2015). A hybrid power line and visible light communication system for indoor hospital applications. *Computers in industry*, 68, 170-178.
- [160] Boukhatem, N., Toumi, S., Bourennane, E. B., Redjati, A., & Fares, A. (2019, November). Simulation Study of Video Transmission by Optical Fiber. In *CITSC* (pp. 20-26).
- [161] Fares, A., Saouchi, K., Brik, F., & Djellab, H. (2022). Analysis of the performance of a coherent SAC-OCDMA-OFDM-DWDM system using a flat optical frequency comb generator for multiservice networks. *Optical and Quantum Electronics*, 54(9), 547.
- [162] Fares, A., Saouchi, K., Brik, F., Saouchi, M. O., & Boukhatem, N. (2021, May). Performance of 60 GHz DPSK-RoF-WDM System Using Optical DSB-SC for Long Distance Networks. In *2021 IEEE 1st International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering MI-STA* (pp. 695-699). IEEE.
- [163] Boukhatem, N., Messaoudi, K., Redjati, A., Fares, A., & Brik, F. (2024). Assessment of Optimization Parameters for Video Transmission over Optical Fiber using an H265/HEVC Encoder in Video Streaming Applications.
- [164] Boukhatem, N., Messaoudi, K., Redjati, A., Nasri, A., & Fares, A. (2022). Co-simulation de système de transmission optique d'une vidéo dans Matlab et OptiSystem. In *Proceedings of the 5th International Conference on Embedded Systems in Telecommunication and Instrumentation (ICESTI'22)*. Annaba, Algeria
- [165] Boukhatem, N., Messaoudi, K., Redjati, A., Brik, F., & Nasri, A. (2024). Analysis of the Compressed Video with HEVC under Optical Link Transmission. *Applied Computer Systems*, 29(1), 53-58.
- [166] Tilbury, B., Arevalillo-Herráez, M., & Ramzan, N. (2023, June). Comparison of constant rate factor and constant bitrate mode encoding for rPPG detection. In *2023 15th International Conference on Quality of Multimedia Experience (QoMEX)* (pp. 205-208). IEEE.
- [167] Katsavounidis, I., & Guo, L. (2018, September). Video codec comparison using the dynamic optimizer framework. In *Applications of digital image processing XLI* (Vol. 10752, pp. 266-281). SPIE.
- [168] Yin, J., Chen, H., Xu, Y., Ma, Z., & Xu, X. (2024). Learning accurate network dynamics for enhanced adaptive video streaming. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 70(3), 808-821.
- [169] De Cock, J., Li, Z., Manohara, M., & Aaron, A. (2016, September). Complexity-based consistent-quality encoding in the cloud. In *2016 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)* (pp. 1484-1488). IEEE.
- [170] Valiandi, I., Panayides, A. S., Kyriacou, E., Pattichis, C. S., & Pattichis, M. S. (2023, September). A comparative performance assessment of different video codecs. In *International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns* (pp. 265-275). Cham: Springer Nature Switzerland.
- [171] Nia, M. F. (2024). Explore Cross-Codec Quality-Rate Convex Hulls Relation for Adaptive Streaming. arXiv preprint arXiv:2408.09044.
- [172] McDuff, D. J., Blackford, E. B., & Estep, J. R. (2017, May). The impact of video compression on remote cardiac pulse measurement using imaging photoplethysmography. In *2017 12th IEEE International Conference on Automatic Face & Gesture Recognition (FG 2017)* (pp. 63-70). IEEE.
- [173] Nia, M. F. (2024). Explore Cross-Codec Quality-Rate Convex Hulls Relation for Adaptive Streaming. arXiv preprint arXiv:2408.09044.
- [174] Bienik, J., Uhrina, M., & Kortis, P. (2017, July). Influence of crf value for compression efficiency. In *2017 International Conference on Information and Digital Technologies (IDT)* (pp. 47-51). IEEE.

- [175] FFmpeg. (n.d.). FFmpeg [Software]. Retrieved August 13, 2024, from <https://www.ffmpeg.org/>
- [176] Oueslati, F. (2014). Un Algorithme D'adaptation Dynamique de Débit pour les Communications Vidéo Interactives sur Internet (Master's thesis, Institut National de la Recherche Scientifique (Canada)).
- [177] Frame.io. (2017, March 6). Calculate video bitrates. Frame.io Blog. <https://blog.frame.io/2017/03/06/calculate-video-bitrates/#formulasTarget>
- [178] Wu, J., Deng, D., Li, Y., Yu, L., Li, K., & Chen, Y. (2024). Low-complexity content-aware encoding optimization of batch video. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 104, 104295.
- [179] Menon, V. V., Rajendran, P. T., Feldmann, C., Schoeffmann, K., Ghanbari, M., & Timmerer, C. (2023). JND-aware two-pass per-title encoding scheme for adaptive live streaming. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 34(2), 1281-1294.
- [180] Menon, V. V., Zhu, J., Rajendran, P. T., Amirpour, H., Le Callet, P., & Timmerer, C. (2023, July). Just noticeable difference-aware per-scene bitrate-laddering for adaptive video streaming. In *2023 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME)* (pp. 1673-1678). IEEE.
- [181] Jain, D. S., & Iyer, B. (2021, February). Performance analysis of the two-channel wdmrof system for various attenuation levels. In *2021 International Conference on Computing, Communication, and Intelligent Systems (ICCCIS)* (pp. 887-893). IEEE.
- [182] Verma, A., Kumar, S., Singh, I., Kumar, A., Saini, R. K., & Moharana, S. K. (2023, March). Mitigation and Comparison of Chromatic Dispersion at Distinct Frequencies Using Hybrid Model at A Bit Rate of 100Gbps over 120Km Distance. In *2023 6th International Conference on Information Systems and Computer Networks (ISCON)* (pp. 1-9). IEEE.
- [183] Gho, G. H., Klak, L., & Kahn, J. M. (2010). Rate-adaptive coding for optical fiber transmission systems. *Journal of Lightwave Technology*, 29(2), 222-233.
- [184] Ke, J., Yi, L., Xia, G., & Hu, W. (2018). Chaotic optical communications over 100-km fiber transmission at 30-Gb/s bit rate. *Optics letters*, 43(6), 1323-1326.
- [185] Gao, Z., Li, Q., Zhang, L., Tang, B., Luo, Y., Gao, X., ... & Qin, Y. (2022). 32 Gb/s physical-layer secure optical communication over 200 km based on temporal dispersion and self-feedback phase encryption. *Optics Letters*, 47(4), 913-916.