الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد – تلمسان –

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen – Faculté de TECHNOLOGIE

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de
MASTER En : TELECOMMUNICATION

Spécialité : Télécommunication optique

Par : NEGADI Mohammed El Mehdi

Sujet

Etude de performance d'un réseau haute débit pour le transfert des donner multimédia

Soutenu publiquement, le 24 / 06 / 2026, devant le jury composé de

M BOUABDALLAH Reda	MAA	Encadreur	Université de Tlemcen
M KHELLADI Mounir	MCB	Président	Université de Tlemcen
M ABRI Mehadji	Professeur	Examinateur	Université de Tlemcen

Année universitaire : 2025 /2026

Remerciements

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

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

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

Nos remerciements les plus respectueux s'adressent également aux membres du jury, M. KHELLADI Mounir et ABRI Mehadji, qui nous font l'honneur d'évaluer ce travail. Nous les remercions vivement pour l'intérêt qu'ils lui portent ainsi que pour leurs observations et suggestions qui contribueront à son enrichissement.

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

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

Dédicace

À mes parents, que Dieu les protège et les gardes pour moi.

Merci pour vous amour inépuisable, vous soutien constant, et vous prières qui m'ont portée.

À mes sœurs : Nihel et Amina

Merci pour votre présence, vos encouragements et votre bienveillance.

À mon oncle : Nassim

Qui m'a vraiment encouragé

À tous mes cousins.

Amine, Mansour, Yassine, Charaf, Abderahmane, Abdessamad.

Tous les membres de ma grande famille NEGADI

Merci pour votre accueil chaleureux, vos encouragements et votre présence rassurante.

Ce travail vous est également dédié.

À toutes mes amies.

NEGADI MOHAMED

Table des matières

Introduction générale **1**
Chapitre I : Généralité sur la compression des donnés **3**
I.1 Introduction 4
I.2 Définition de la compression 4
I.3 Classification des algorithmes de compression 5
I.3.1 Compression symétrique et asymétrique 5
I.3.2 Compression physique / logique 5
I.3.3 La compression statistique / numérique 6
I.3.4 Types de compression 6
I.3.4.1 Compression avec pertes (lossy) 6
I.3.4.1.1 Principe de la compression avec pertes 7
I.3.4.1.2 Techniques utilisées 7
I.3.4.2 Compression sans pertes (lossless) 8
I.3.4.2.1 Principe de la compression sans pertes 8
I.3.4.2.2 Techniques utilisées 8
I.4 Techniques de compression de base 9
I.4.1 Compression nulle 9
I.4.2 Compression de longueur ou RLE 9
I.4.3 Codage des mots-clés 10
I.4.4 Codage adaptable de Huffman 10
I.4.5 Le codage de Shannon 12
I.4.6 Le codage Shannon-Fano 14
Chapitre II : La compression des vidéos **16**
II.1 Introduction 17
II.2 Définition 17
II.3 Codecs vidéo 18
II.4 Principes de compression vidéo 18
II.4.1 Images Intra (I-Frames) 18
II.4.2 P-Frames 19
II.4.3 B-Frames 20
II.4.4 Format de flux binaire de base 22
II.5 Format H.261 23
II.6 Format H.263 25
II.7 Standard H.264 / AVC 26
II.8 Format H.265 / HEVC 28
II.10 Conclusion 30
Chapitre III : Les réseaux hauts débit **31**
III.1 Introduction 32
III.2 Les réseaux haut débit 32
III.2.1 Définition des réseaux haut débit 32
III.2.2 Caractéristiques des réseaux haut débit 32
III.2.3 Technologies haut débit 33
III.2.3.1 Réseaux sans fil 33
III.2.3.1.1 Quatrième génération de réseaux mobiles (4G) 33
III.2.3.1.2 Cinquième génération de réseaux mobiles (5G) 35
III.2.3.1.3 Wi-Fi 35
III.2.3.1.4 Avantages des réseaux sans fil (Wi-Fi, 4G, 5G) 39

III.2.3.1.5 Inconvénients des réseaux sans fil (Wi-Fi, 4G, 5G)... 39
III.2.3.2 Réseaux filaires haut débit 40
III.2.3.2.1 Présentation des réseaux filaires..... 40
III.2.3.2.2 Technologies principales..... 40
III.2.3.2.3 Principe de fonctionnement..... 43
III.2.3.2.4 Avantages et inconvénients des réseaux filaires 43
III.2.3.2.5 Limites des réseaux filaires haut débit..... 44
III.2.3.2.6 Applications des réseaux filaires haut débit..... 46
III.2.3.2.7 Caractéristiques spécifiques des réseaux sans fil 48
4. Critères de performance des réseaux hauts débit 49
5. Applications multimédias et besoins en haut débit 50
Chapitre IV : Étude comparative 52
IV.1 Introduction 53
IV.2 Objectifs 53
IV.3 Outils et environnement 54
IV.4 Expérimentation de la compression d'images 55
4.1 Méthode 1 : compression manuelle 56
4.2 Méthode 2 : compression automatisée.....57
4.3 Analyse et interprétation des résultats 65
4.4 Analyse des résultats de compression.....67
IV.5 Étude de la transmission des vidéos compressées sur un réseau Wi-Fi..... 68
5.1 Environnement expérimental 68
5.2 Configuration réseau.....69
5.3 Résultats de la diffusion.....72
5.4 Analyse des résultats de streaming 73
IV. Conclusion..... 74
Conclusion générale.....75
Références.....77

Liste des figures

Figure 1 : Compression de type symétrique 5
Figure 2 : Comparaison de la compression avec perte selon le pourcentage de compression7
Figure 3 : Comparaison de la compression sans perte 9
Figure 4 : Arbre de Huffman.....11
Figure 5 : Fréquence d'apparition des lettres en français 12
Figure 6 : Caractéristiques statistiques de « BANANES ET ANANAS » 13
Figure 7 : Première subdivision 15
Figure 8 : Deuxième subdivision 15
Figure 9 : Troisième partition 15
Figure 10 : Partition finale 15
Figure 11 : Diagramme d'I-Frame 19
Figure 12 : Diagramme de P-Frame 20
Figure 13 : Diagramme de B-Frame.....21
Figure 14 : Possibilités des séquences de trames 22
Figure 15 : Structure du flux binaire du format H.261 24
Figure 16 : Codeur source du format H.263 26
Figure 17 : Diagramme de blocs du codeur H.264 27
Figure 18 : Schéma de principe du codeur HEVC 28
Figure 21 : Pays équipés de réseaux LTE en 2018 34
Figure 22 : Structure d'une fibre optique 42
Figure 23 : Base de vidéos de sortie contenant les vidéos compressées aux différents formats 63
Figure 24 : Exemple de fichiers dans différents formats de compression selon le rapport CRF 64
Figure 25 : Architecture du réseau utilisé.....70
Figure 26 : VLC, logiciel utilisé pour le transfert des vidéos.....71
Figure 27 : Wireshark, outil d'analyse réseau.....72

Liste des tableaux

Tableau 1 : Table de fréquence des lettres (exemple Huffman) 11
Tableau 2 : Table des codes de Huffman extraits 12
Tableau 3 : Tableau comparatif global entre les codecs vidéo 29
Tableau 4 : Principales caractéristiques techniques de la technologie 4G (LTE).....34
Tableau 5 : Principaux standards IEEE relatifs au Wi-Fi.....36
Tableau 6 : Comparaison des protocoles de sécurité Wi-Fi 39
Tableau 7 : Points forts et avantages des réseaux sans fil 39
Tableau 8 : Inconvénients et limites des réseaux sans fil 40
Tableau 9 : Avantages de stabilité et de performance des réseaux filaires 44
Tableau 10 : Inconvénients des réseaux filaires.....44
Tableau 11 : Éléments de commande et options CRF pour l'outil FFmpeg.....57
Tableau 12 : Résultats détaillés de la compression des 10 vidéos 67
Tableau 13 : Résultats de streaming et de métrologie des 9 scénarios réseau 73

Liste des abréviations

AP : Access Point

ASCII : American Standard Code for Information Interchange

AVC : Advanced VideoCoding

DCT : DiscreteCosineTransform

FFmpeg : FastForward MPEG

GOP : Group of Pictures

HD : High Definition

HEVC : High EfficiencyVideoCoding

IEEE : Institute of Electrical and ElectronicsEngineers

IoT : Internet of Things

IP : Internet Protocol

LAN : Local Area Network

LTE : Long Term Evolution

Mbps : Mégabits par seconde

MIMO : Multiple Input Multiple Output

MPEG : Moving Picture Experts Group

QoS : Quality of Service

RLE : RunLengthEncoding

RTP : Real-time Transport Protocol

UIT : Union Internationale des Télécommunications

VCEG : VideoCoding Experts Group

VLC : VideoLAN Client

WEP : Wired Equivalent Privacy

Wi-Fi : Wireless Fidelity

WLAN : Wireless Local Area Network

WPA : Wi-Fi Protected Access

RÉSUMÉ

Ce mémoire de fin d'étude étudie l'influence de la compression vidéo sur les performances des réseaux haut débit lors du transfert de données multimédias. Il présente les principales techniques de compression des données ainsi que les codecs vidéo H.264 et H.265. Une étude des réseaux haut débit, notamment le Wi-Fi, est également réalisée. La partie expérimentale consiste à compresser plusieurs vidéos avec FFmpeg et Python, puis à les transmettre sur un réseau Wi-Fi à l'aide de VLC. Les performances sont analysées avec Wireshark en mesurant le débit, la gigue, les pertes de paquets et le volume de données transférées. Les résultats montrent que le codec H.265 offre une meilleure efficacité de compression que H.264, ce qui permet de réduire la charge du réseau tout en conservant une bonne qualité vidéo. Cette étude confirme l'intérêt de la compression vidéo pour optimiser les transmissions multimédias sur les réseaux haut débit**.**

Mots-clés : Compression vidéo, H.264/AVC, H.265/HEVC, Réseau haut débit, Wi-Fi, Transmission multimédia, Performances réseau, Wireshark**.**

Abstract

This thesis investigates the influence of video compression on the performance of broadband networks during multimedia data transfer. It presents the main data compression techniques as well as the H.264 and H.265 video codecs. A study of broadband networks, including Wi-Fi, 4G, 5G, and fiber optics, is also conducted.The experimental part consists of compressing several videos using FFmpeg and Python, then transmitting them over a Wi-Fi network using VLC. Performance is analyzed with Wireshark by measuring through put, jitter, packetloss, and the volume of data transferred. The results show that the H.265 codec offersbetter compression efficiency than H.264, thusre ducing network load while maintaining good video quality. This study confirms the value of video compression for optimizing multimedia transmissions over broadband networks.

Keywords: Video Compression, H.264/AVC, H.265/HEVC, High-Speed Network, Wi-Fi, Multimedia Transmission, Network Performance, Wireshark.

الملخص

تتناول هذه المذكرة النهائية دراسة تأثير ضغط الفيديو على أداء شبكات النطاق العريض أثناء نقل البيانات متعددة الوسائط. كما تعرض أهم تقنيات ضغط البيانات، بالإضافة إلى ترميزي الفيديو **H.264**و .**H.265** وتم كذلك إجراء دراسة لشبكات النطاق العريض، ولا سيما **الواي فاي (Wi-Fi) ,الجيل الرابع 4G, الجيل الخامس5G** و**الألياف البصرية**.

أما الجانب التطبيقي، فقد تمثل في ضغط مجموعة من مقاطع الفيديو باستخدام برنامجي **FFmpeg** و**Python**، ثم إرسالها عبر شبكة **Wi-Fi**باستخدام برنامج .**VLC**وتم تحليل الأداء باستعمال برنامج **Wireshark**من خلال قياس معدل نقل البيانات . Débitوالتذبذب الزمني(Jitter) ، وفقدان الحزم، وحجم البيانات المنقولة.

وأظهرت النتائج أن ترميز **H.265**يوفر كفاءة ضغط أعلى من **H.264**، مما يساهم في تقليل الحمل على الشبكة مع الحفاظ على جودة فيديو جيدة. وتؤكد هذه الدراسة أهمية ضغط الفيديو في تحسين عمليات نقل الوسائط المتعددة عبر شبكات النطاق العريض.

الكلمات المفتاحية:

ضغط الفيديو، H.264/AVC، H.265/HEVC، شبكات النطاق العريض، الواي فاي(Wi-Fi) ، نقل الوسائط المتعددة، أداء الشبكات، Wireshark

Introduction générale

L'évolution rapide des technologies numériques a entraîné une croissance importante de la quantité de données multimédias échangées sur les réseaux de communication. Parmi ces données, la vidéo représente aujourd'hui une part considérable du trafic Internet en raison de l'essor des plateformes de streaming, de la visioconférence, de la vidéosurveillance et des services multimédias en ligne. Cette augmentation continue du volume de données pose plusieurs défis liés au stockage, à la transmission ainsi que la bonne exploitation de la bande passante disponible.

Afin de répondre à ces contraintes, les techniques de compression jouent un rôle essentiel. La compression vidéo permet de diminuer la taille des fichiers tout en gardant une qualité qui soit acceptable par les utilisateurs. Grâce à cette réduction, il devient possible de diminuer les besoins en stockage et d'améliorer l'efficacité de la transmission sur les réseaux haut débit. Parmi les standards les plus utilisés figurent les codecs H.264/AVC et H.265/HEVC, reconnus pour leurs performances en matière de compression et de qualité vidéo.

Le but principal de ce mémoire est d'étudier l'effet de la compression vidéo sur les performances de son transfert dans un environnement réseau haut débit. Pour atteindre cet objectif, une étude théorique des techniques de compression et des principaux standards vidéo a été réalisée, suivie d'une analyse des technologies de réseaux hauts débit utilisées pour le transport des contenus multimédias.

La partie pratique repose sur la compression d'un ensemble de vidéos à l'aide des codecs H.264 et H.265 en utilisant deux approches : une méthode manuelle basée sur FFmpeg et une méthode automatisée développée en Python. Les vidéos obtenues ont ensuite été transmises entre deux ordinateurs via VLC Media Player, tandis que les paramètres de qualité du réseau ont été mesurés à l'aide de Wireshark à travers différents paramètres tels que le débit, le volume de données transférées, le nombre de paquets transmis, la durée de transmission, la gigue et les pertes de paquets.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres. Le premier décrit les notions fondamentales de la compression des données et les principales techniques utilisées.

Le deuxième chapitre est consacré à la compression vidéo et aux différents standards de codage vidéo, notamment H.261, H.263, H.264 et H.265. Le troisième chapitre présente les réseaux haut débit et les technologies de transmission utilisées pour le transport des contenus multimédias. Enfin, le quatrième chapitre décrit la mise en œuvre pratique du projet, les expérimentations réalisées ainsi que l'analyse des résultats obtenus.

Premier chapitre

Généralité sur la compression des donnés

I.1 Introduction :

De nos jours, la compression de données constitue un outil essentiel pour optimiser le stockage des fichiers. Ce procédé consiste à réduire le volume des données qu'il s'agisse d'images, de sons ou de vidéos, afin de faciliter leur diffusion et leur téléchargement. Ce chapitre propose une introduction générale aux différentes méthodes de compression existantes.

I.2 Définition de la compression :

De manière générale, le processus de compression de données vise à encoder l'information de façon plus compacte afin d'en minimiser l'encombrement. Cette opération, exécutée par un logiciel dédié, met en œuvre des algorithmes spécifiques pour diminuer le volume des données et ainsi optimiser les ressources de stockage disponibles. Également désignée sous les termes de réduction de débit ou codage source, la compression consiste à modifier ou convertir la structure binaire des informations. Cette transformation permet de réduire l'espace disque consommé par un ou plusieurs éléments de données.

L'objectif fondamental demeure de garantir une conservation de l'information la plus fidèle possible, tout en occupant un espace minimal.

L'efficacité d'une technique de compression s'évalue principalement selon les critères suivants :

- Le taux de compression global ;
- La qualité de l'image obtenue après la décompression.
- La performance temporelle du traitement vidéo.

Transformer des informations en une forme plus courte pour qu'elles prennent moins de place. Elle est réalisée à l'aide d'un programme qui applique une méthode pour réduire la taille des données et économiser de l'espace de stockage.

I.3 Classification des algorithmes de compression

I.3.1 Compression symétrique et asymétrique

Une compression est dite **symétrique** lorsque les algorithmes d'encodage et de décodage sont identiques et mobilisent des ressources de calcul équivalentes. En raison de cet équilibre, ce modèle constitue la norme de référence pour les transmissions de flux de données effectuées en temps réel.

À l'opposé, la compression **asymétrique** se caractérise par une différence notable dans l'intensité de travail entre les deux phases. Dans la majorité des cas, l'étape de compression s'avère plus ardue et nécessite davantage de temps que le décodage. Ce type d'approche est idéal pour l'archivage de fichiers consultés de manière ponctuelle, où une décompression rapide est privilégiée par rapport à la vitesse de l'encodage initial.

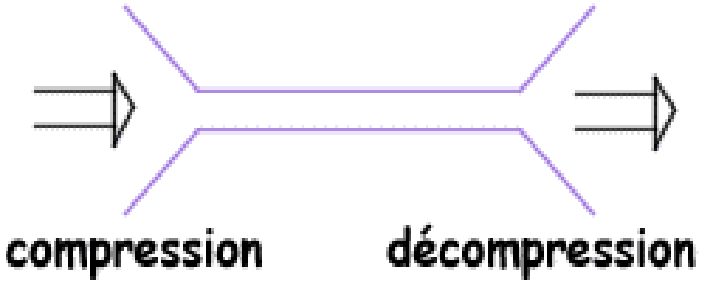


Figure 1: Compression de type symétrique

I.3. 2.Compression physique / logique :

La compression de données peut être appréhendée selon deux perspectives majeures. Traditionnellement, on la définit comme un procédé algorithmique visant à réduire massivement le volume de données afin d'occuper un espace minimal (*compression physique*). Une autre approche consiste à voir la compression comme

une technique de recodage, où l'information est transposée dans une représentation alternative plus concise tout en préservant son intégrité (*compression logique*).

Cette distinction entre les formes physique et logique repose essentiellement sur le mécanisme employé pour obtenir une forme de donnée plus compacte.

La *compression physique* agit directement et exclusivement sur la structure même des informations contenues dans les données. Cette approche génère souvent des fichiers dont le contenu brut semble dénué de sens ou incompréhensible au premier abord. Le gain d'espace est ici réalisé grâce à l'élimination des redondances internes par l'algorithme. Il est à noter que les méthodes de compression que nous détaillerons par la suite appartiennent toutes à cette catégorie physique.

À l'inverse, la *compression logique* s'opère par un mécanisme de substitution. Elle consiste à remplacer un symbole (qu'il soit binaire, numérique ou alphabétique) par un équivalent plus court. L'abréviation de « United States of America » en « USA » illustre parfaitement ce principe : le code réduit découle de l'information source et conserve une signification identique. Ce type de substitution intervient généralement au niveau du caractère ou à des échelons supérieurs, en se fondant sur l'analyse sémantique des données traitées. [3]

I.3.3. La compression statistique / numérique :

Pour les algorithmes opérant à un niveau statistique, la valeur intrinsèque des motifs n'est pas prépondérante. Ce sont les probabilités qui prévalent, permettant au résultat de rester identique même après une substitution de motifs. À l'inverse, pour les méthodes agissant au niveau numérique, comme le format JPEG, la valeur des motifs impacte directement la compression, rendant toute substitution impossible.

En définitive, le critère de classification le plus significatif repose sur la présence ou l'absence de perte de données. [3]

I.3.4. types de compression :

3.4.1 Compression avec pertes (lossy)

La compression avec pertes est principalement appliquée aux données multimédias telles que les images, les vidéos et les fichiers audio. Ces données contiennent souvent des informations redondantes qui peuvent être réduites sans altérer fortement la perception humaine.

L’œil humain ne distingue pas toutes les variations de couleurs avec la même précision, surtout lorsque les différences sont faibles ou lorsque les couleurs sont éloignées les unes des autres dans l’image. Les algorithmes de compression exploitent cette caractéristique pour supprimer certaines informations peu perceptibles. Cette méthode permet de diminuer de manière importante la taille des données tout en conservant une qualité visuelle jugée acceptable par la majorité des utilisateurs.

I. 3.4.1.1 Principe de Compression avec pertes :

La compression avec pertes (Lossy Compression) est une méthode de réduction de la taille d'un fichier (image, audio, vidéo) en supprimant définitivement les données redondantes ou invisibles/inaudibles pour l'être humain. Contrairement à la compression sans pertes (comme le ZIP ou le PNG), il est mathématiquement impossible de reconstruire le fichier d'origine à l'identique après décompression.

I.3.4.1.2 Les Techniques utilisées :

Les techniques utilises dans la compression avec perte son :

- Codage de Huffman
- RLE (RunLengthEncoding)
- Codage par dictionnaire (LZW, DEFLATE)



Figure 2 : Comparaison de la compression avec perte selon le pourcentage de compression [2]

I. 3.4.2 Compression sans pertes (lossless)

La compression sans perte conserve l'ensemble des informations du fichier d'origine. Après la décompression, les données retrouvées sont identiques aux données initiales. Cette méthode réduit la taille du fichier en réorganisant les informations de manière plus compacte. Des formats tels que GZIP pour les fichiers de données ou PNG pour certaines images reposent sur ce principe. La compression sans perte est également appelée compactage.

Aucune méthode de compression sans perte ne permet de réduire efficacement la taille de tous les fichiers. Lorsqu'un algorithme parvient à diminuer la taille de certains fichiers, il peut aussi augmenter celle d'autres fichiers. Les formats de compression sans perte sont généralement identifiés par leur extension, comme ".zip", ajoutée à la fin du nom du fichier.

I.3.4.2.1Principe de La compression sans pertes :

La compression avec pertes réduit fortement la taille des fichiers en supprimant certaines informations visuelles peu perceptibles. Cette méthode permet d'obtenir des taux de compression plus élevés que la compression sans perte.

Après la décompression, l'image ou la vidéo obtenue n'est pas strictement identique au fichier d'origine. Une partie des informations est supprimée de manière permanente afin de diminuer le volume des données tout en conservant une qualité visuelle acceptable.

I.3.4.2.2 Les Techniques utilisées :

- Compression JPEG (basée sur la transformation DCT)
- Compression JPEG2000 (basée sur les ondelettes)
- WebP (format moderne optimisé pour le web)
- H.264 (AVC) (pour les vidéos basées sur la transformation DCT temporelle)

- H.265 (HEVC) (format moderne)



Figure 3 : Comparaison de la compression sans perte

I.4 Techniques de compression de base

Voici les méthodes de compression les plus simples qui sont décrites ici

I.4.1 Compression nulle :

Remplace une suite d'espaces par un code, accompagné d'un nombre qui indique combien d'espaces ya t'il.

I.4.2 Compression de longueur ou RLE :

Le codage par longueur de plage (RLE) est une méthode de compression très répandue, fréquemment employée pour réduire la taille des valeurs d'attributs. Cette technique complète la compression nulle en encodant toute séquence composée d'au moins quatre caractères identiques consécutifs.

Le principe repose sur le remplacement de ces séries par un code de compression spécifique, suivi du caractère concerné et d'une valeur numérique indiquant son nombre d'occurrences.

Par **exemple**, la chaîne **ccdddddaaacbbbbbbc** devient **c2d5a3c1b6c1**. Dans ce cas, nous analysons la chaîne depuis le début : la répétition « cc » est codée « c2 », tandis que la série **ddddd** est transcrite par « d5 », et ainsi de suite. L'algorithme consiste

donc à dénombrer les répétitions successives d'un symbole et à accoler ce chiffre à sa droite pour exprimer la redondance.[1]

I.4.3 Codage des mots clés :

L'algorithme construit une table contenant les groupes de caractères les plus fréquents. Les séquences qui apparaissent souvent, comme "sh", "th" ou d'autres combinaisons courantes, sont remplacées par des codes plus courts appelés jetons. Cette méthode réduit la quantité de données à stocker ou à transmettre tout en conservant l'information d'origine.

I.4.4 Codage adaptable de Huffman :

Le codage de Huffman est une méthode de compression statistique qui permet de générer un dictionnaire de codes optimaux pour une distribution de probabilités donnée. Cette technique repose sur le principe du codage à longueur variable, où les symboles les plus fréquents reçoivent les codes les plus courts.

En s'appuyant sur les travaux de Claude Shannon sur la théorie de l'information, il est établi que l'efficacité maximale d'un message est atteinte lorsque la longueur moyenne du code tend vers l'entropie de la source.

Pour un ensemble de symboles S1 à Sn possédant des probabilités d'occurrence respectives P1 à Pn, l'entropie H(S) est définie par l'expression mathématique suivante : **Entropie = Σ Pi log2 (1/ Pi)**

L'objectif du codage de Huffman est de minimiser le nombre moyen de bits par symbole afin de s'approcher de cette limite théorique. Pour illustrer ce processus, considérons l'exemple suivant basé sur la répartition fréquentielle des lettres dans un échantillon de 120 caractères :

On a les données dans le tableau suivant :

Lettre	**A**	**B**	**C**	**D**	**E**	**F**	**G**	**H**
Fréquence	**32**	**42**	**7**	**42**	**24**	**37**	**2**	**120**

Tableau 1: Table de fréquence des lettres [1]

On commence par additionner les deux plus petites fréquences et on les place comme feuilles dans l'arbre. On répète cette étape en ajoutant à chaque fois les plus petites valeurs jusqu'à obtenir la somme totale. Ensuite, on attribue 0 aux branches à gauche et 1 à celles à droite, puis on construit l'arbre de Huffman correspondant.

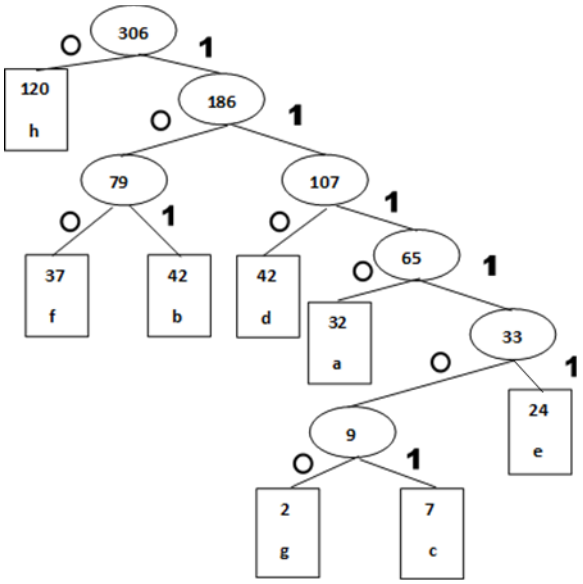


Figure 4 : Arbre de Huffman**.**

D'après l'arbre de Huffman nous avons extrait le code binaire de chaque lettre.

Lettre	Fréq	Code	Bits
H	120	0	1
B	42	101	3
D	42	110	3
F	37	100	3
A	32	1110	4
E	24	1111	5
C	7	111101	6
G	2	111100	6

.

Tableau 2 : Table des codes de Huffman [1]

I.4.5 Le codage de Shannon :

Établi à la fin des années 1940, le concept de codage statistique s'appuie sur les recherches de Claude Shannon au sein des laboratoires Bell. Le mathématicien y démontrait qu'il est possible de densifier les flux de données sans altérer le sens original de l'information.

Le principe fondamental repose sur l'entropie, qui définit la densité d'information d'un message. Celle-ci se calcule selon la probabilité d'apparition de chaque élément. L'entropie diffère souvent de la taille réelle du message car la plupart des communications présentent des redondances importantes, rendant prévisibles certaines séquences répétitives.

L'identification de ces fréquences d'apparition permet d'éliminer les surplus d'informations et d'optimiser l'encodage. En effet, la prévisibilité d'un symbole augmente avec sa fréquence d'usage.

Ainsi, plus un élément est porteur d'une entropie élevée, moins il requiert de ressources pour être identifié. Un codage basé sur cette valeur permet alors d'attribuer moins d'espace aux symboles fréquents qu'aux caractères plus rares, dont l'occurrence est plus incertaine.[3]

e	11	n	6,6	m	3	f	1,22	j	0,17	ç	0,04
s	9,27	o	6,04	p	2,79	v	1,01	z	0,12	w	0,03
i	8,61	é	4,87	d	2,23	q	0,88	k	0,12	ô	0,03
a	7,8	l	4,75	g	1,91	y	0,65	ï	0,08	î	0,03
r	7,42	u	4,49	h	1,67	x	0,41	â	0,08	û	0,03
t	6,8	c	3,87	b	1,64	è	0,3	ê	0,06	à	0,01

Figure 5 : Fréquence d'apparition des lettres en français [3]

Bien que cette distribution ait été établie à l'aide d'un dictionnaire, elle varie sensiblement selon la nature du contenu traité (qu'il soit commercial, littéraire ou autre). **Exemple :**

Toutefois, il est possible de s'appuyer sur la théorie de l'information **pour un message spécifique** afin d'en évaluer les probabilités et de concevoir une méthode de codage optimisée.

À titre d'illustration, considérons la séquence "BANANES ET ANANAS". Les caractéristiques statistiques propres à ce message sont détaillées dans la (figure 6). L'analyse de ces données révèle qu'un encodage optimal, conforme aux principes de Shannon, permettrait de réduire le message à seulement 43,945 bits, contre 136 bits pour un codage ASCII classique. Dans cette configuration, le symbole « A » pourrait être encodé sur moins de 2 bits (précisément 1,765 bits), à la condition d'allouer 4,08 bits pour la représentation du symbole « T ». [3]

s	f(s)	p(s)	H(s)	H	ASCII
A	5	0.294	1.765	8.825	40
N	4	0.235	2.09	8.36	32
E	2	0.118	3.1	6.2	16
S	2	0.118	3.1	6.2	16
<space>	2	0.118	3.1	6.2	16
B	1	0.059	4.08	4.08	8
T	1	0.059	4.08	4.08	8
Total	**17**		**21.315**	**43.945**	**136**

Figure 6: Caractéristiques statique de **"BANANES ET ANANAS"**

s : symbole

f(s) : fréquences d'apparition du symbole p(s) : probabilité d'apparition du symbole

H(s) : quantité d'information convoyée par le symbole

H : quantité d'information cumulée par ce symbole (f(s) * H(s))

ASCII : quantité de décision selon un code ASCII

Plusieurs méthodes ont été développées pour utiliser les propriétés statistiques des messages.

Nous allons étudier les deux plus classiques [3]

I.4.6 Le codage Shannon-Fano :

Shannon et Fano ont élaboré indépendamment un algorithme identique permettant de générer un code efficace à partir d'une distribution de probabilités quelconque.

Le fonctionnement de cet algorithme repose sur les étapes suivantes : les symboles sont tout d'abord classés par ordre décroissant de fréquence. Cette liste ordonnée sert de base à la procédure de codage, où chaque symbole est initialement associé à une séquence vide.

Par la suite, la liste est scindée en deux parties, tout en préservant l'ordre des symboles, de telle sorte que la somme des fréquences de la première partie soit la plus proche possible de celle de la seconde.

On attribue ensuite le bit « 0 » à la fin de tous les codes des symboles appartenant au premier groupe, et le bit « 1 » à ceux du second groupe.

Cette méthode est appliquée de manière récursive sur chaque sous-liste jusqu'à ce qu'elles ne contiennent plus qu'un seul élément. Ce processus permet d'obtenir un code uniquement décodable présentant une structure arborescente (treestructured code). Toutefois, l'algorithme comporte certaines limites, notamment la difficulté de déterminer avec certitude l'emplacement optimal de la césure pour minimiser la différence entre les sommes des fréquences.

Exemple pratique de codage Shannon-Fano

L'application de l'algorithme de Shannon-Fano à notre message-témoin permet d'effectuer sa compression. Dans l'arbre de codage qui en résulte, la valeur « 0 » est généralement associée à la branche de gauche et la valeur « 1 » à la branche de droite. Il convient de noter que ce choix est arbitraire et n'exerce aucune influence sur l'efficacité finale du codage.

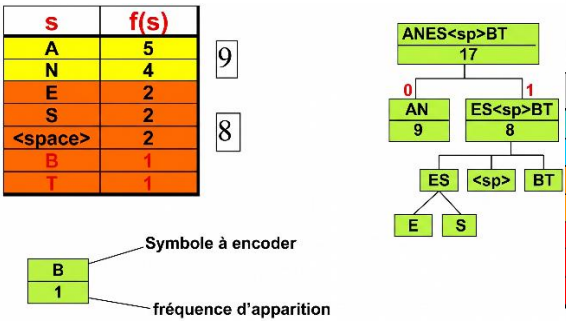


Figure 7: Première subdivision selon

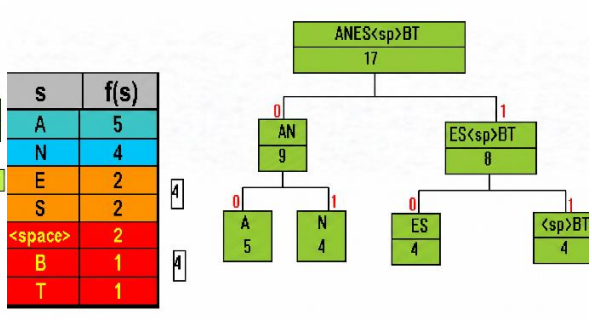


Figure 8: Deuxième subdivision

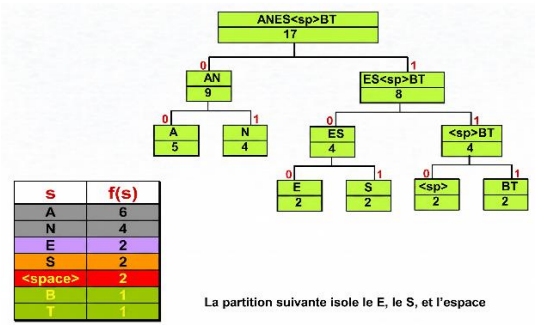


Figure 9: troisième partition

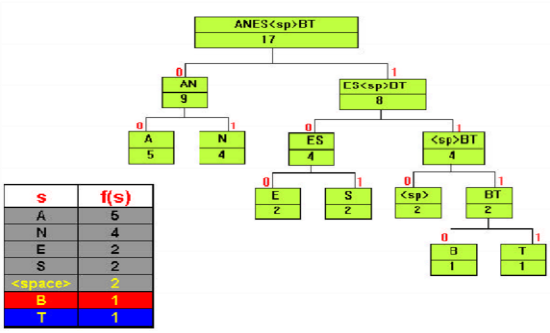


Figure 10: partition final

Pour connaître le code associé à chaque lettre, on parcourt l'arbre final de haut en bas, et l'on obtient :

A 00

N 01

E 100

S 101

<space> 110

B 1110

T 1111

L'analyse démontre que le résultat obtenu est extrêmement proche de la quantité d'information théorique, s'élevant à 44 bits, ce qui rend la redondance quasiment inexistante. Bien que le codage de Shannon-Fano frôle l'optimisation parfaite en

pratique, son efficacité dépend de la manière de subdiviser la liste des symboles. En l'absence d'une méthode unique et évidente pour déterminer la subdivision optimale, il subsiste un risque de générer un code plus long que nécessaire. [3]

Deuxième chapitre
La compression des vidéos

II.1 Introduction

Aujourd'hui, la vidéo occupe une place très importante dans la vie quotidienne, que ce soit pour regarder des films, suivre des cours, communiquer ou utiliser différentes applications. Cependant, les fichiers vidéo sont souvent très volumineux et nécessitent beaucoup d'espace de stockage ainsi qu'un débit élevé pour être transmis.

La compression vidéo permet de réduire la taille de ces fichiers afin de faciliter leur stockage et leur transmission. Pour cela, elle supprime les informations les moins importantes tout en essayant de conserver une bonne qualité.

Les méthodes de compression vidéo sont utilisées dans de nombreux domaines, comme les appels en vidéo, les vidéos à la demande ou les communications avec image. Des normes comme MPEG et H.26X sont largement utilisées dans ces applications. Leur efficacité est très importante, car les vidéos demandent souvent un débit élevé pour être transmises correctement.

II.2 Définition

Le codage vidéo correspond à la compression et à la décompression d'un signal vidéo numérique.

Les méthodes de compression réduisent les données répétées dans une vidéo. Cela permet d'envoyer le fichier plus facilement sur un réseau et de le stocker sur un disque. Une bonne méthode permet de diminuer la taille du fichier tout en gardant une qualité d'image acceptable.

Si le niveau de compression augmente, la qualité de la vidéo peut baisser.

Le but reste de réduire l'espace de stockage et la quantité de données nécessaire pour la transmission.

II.3 Vidéo codecs

Un codec est une méthode de compression. Il sert à réduire la taille d'une vidéo ou d'un son lors de l'enregistrement, puis à les restituer lors de la lecture. Par exemple, le MP3 est une méthode connue pour le son. Les lecteurs savent lire ce format, et les programmes d'enregistrement savent le produire. Il existe aussi plusieurs méthodes pour la vidéo comme H.264, HEVC ou MPEG-2.

Un format est un fichier qui contient ces éléments. Il peut regrouper une vidéo, un son et parfois d'autres données. Il garde aussi des informations sur ces contenus. Parmi les formats connus, on trouve mp4, avi, mov et ogg.

II.4 Principes de compression vidéo

- La vidéo se définit comme une suite de clichés numériques, souvent qualifiée d'images animées.
- Le format Motion JPEG permet d'encoder une vidéo en appliquant l'algorithme JPEG à chaque image individuellement.
- Outre la redondance spatiale propre à chaque image, les séquences vidéo présentent généralement une redondance temporelle importante entre les clichés consécutifs.
- L'encodage repose sur trois types de trames fondamentales : les images I, P et B.

II.4.1 Les images Intra (I-Frames) :

- Ces images sont encodées de manière autonome via l'algorithme JPEG.
- Elles sont intégrées de façon régulière et fréquente au sein du flux de données.
- Dans le flux binaire, les images I servent de points de repère essentiels pour permettre l'accès aléatoire ainsi que les fonctions de lecture accélérée avant et arrière (FF / FR). [1]

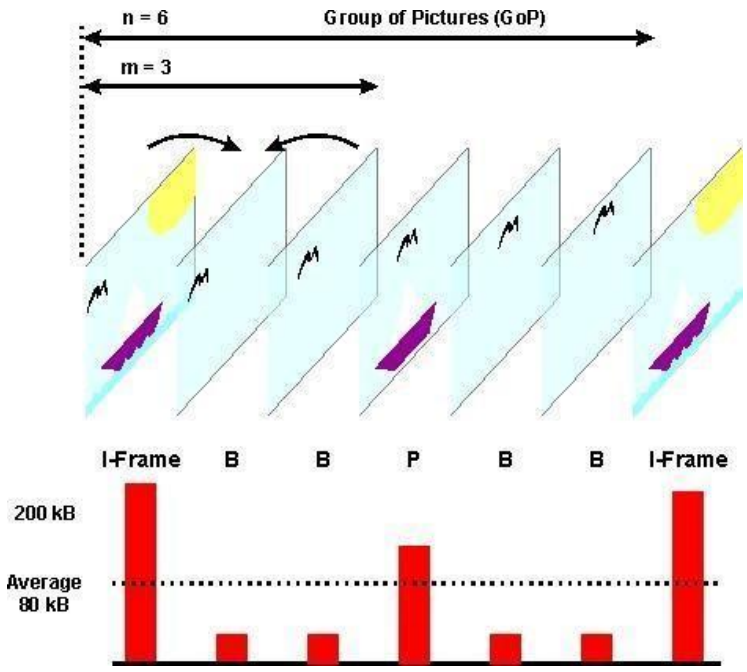


Figure 11 : image représente le diagramme d'I-Frame [1]

II.4.2 P-Frames:

- Les cadres sont découpés en macroblocs de 16x16 pixels.
- L'encodage d'une trame P repose sur une comparaison pixel par pixel entre chaque macrobloc de la trame cible et une trame de référence (de type I ou P) afin d'identifier un bloc identique.
- Le processus d'estimation de mouvement permet de déterminer le vecteur de mouvement, qui correspond au décalage (x, y) entre le macrobloc encodé et le bloc de référence le plus proche.
- À partir de ces vecteurs, une trame prédite est générée. L'écart entre cette prédiction et la trame réelle constitue l'erreur de prédiction.
- Enfin, la compensation de mouvement utilise des bits additionnels pour coder cette erreur, permettant ainsi de corriger les différences si cela s'avère nécessaire. [1]

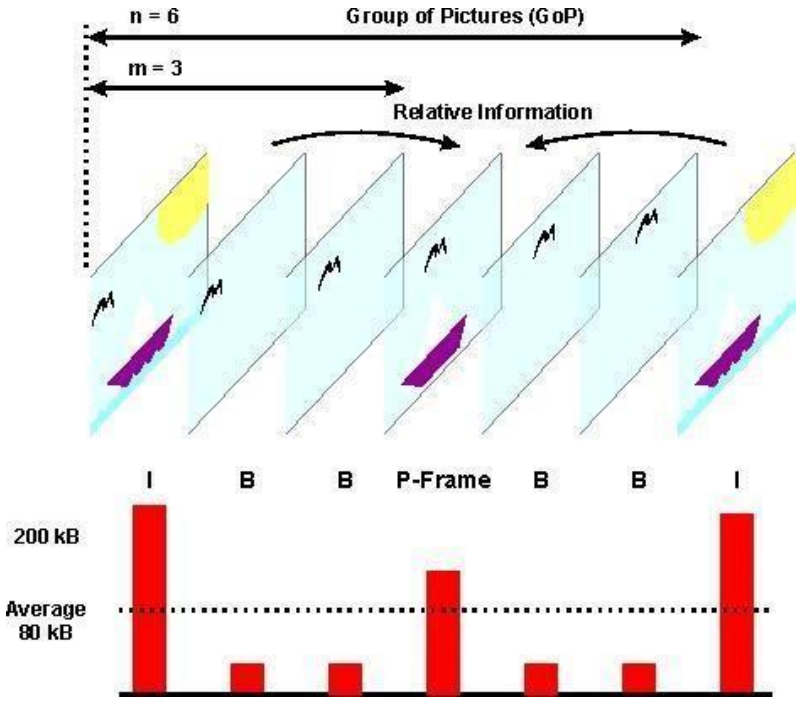


Figure 12 : image représente le diagramme de P-Frame [1]

II.4.3 B-Frames:

- L'estimation du mouvement pour l'encodage d'une trame B s'effectue en se référant simultanément à la trame I ou P précédente et à celle qui suit immédiatement.
- Ces images B permettent d'atteindre les taux de compression les plus élevés.
- Comme elles ne servent pas de référence pour le codage d'autres trames, elles évitent toute propagation d'erreurs.
- On appelle Groupe d'Images (GOP) le nombre total de trames situées entre deux I-frames consécutives.
- La plage de prédiction désigne la quantité de trames séparant un cadre P de la trame I ou P qui le précède directement.
- Afin d'optimiser la vitesse de décodage des images, l'ordre habituel de transmission et de codage des cadres subit des modifications.

- Il existe un type additionnel nommé PB-frame, où deux cadres adjacents (P et B) sont encodés comme une entité unique.

- Enfin, la D-frame représente un cinquième type de cadre, spécifiquement conçu pour les services de vidéo à la demande. [1]

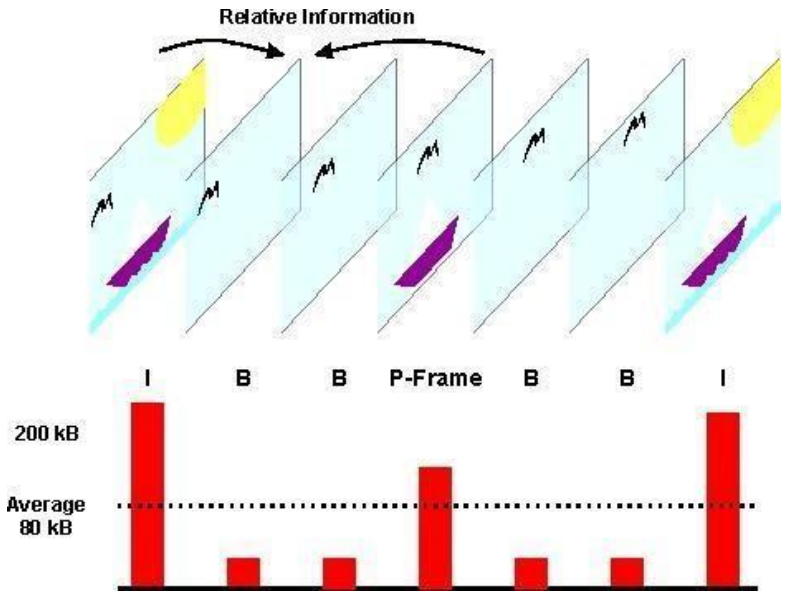


Figure .13 : image représente le diagramme de B-Frame [1]

Exemple de séquence de trame :

(1)- Seulement I-Frame et P-Frame.

(2)-Les trois frames (I-, P-, B-Frame)**.**

(3)-PB-Frames.

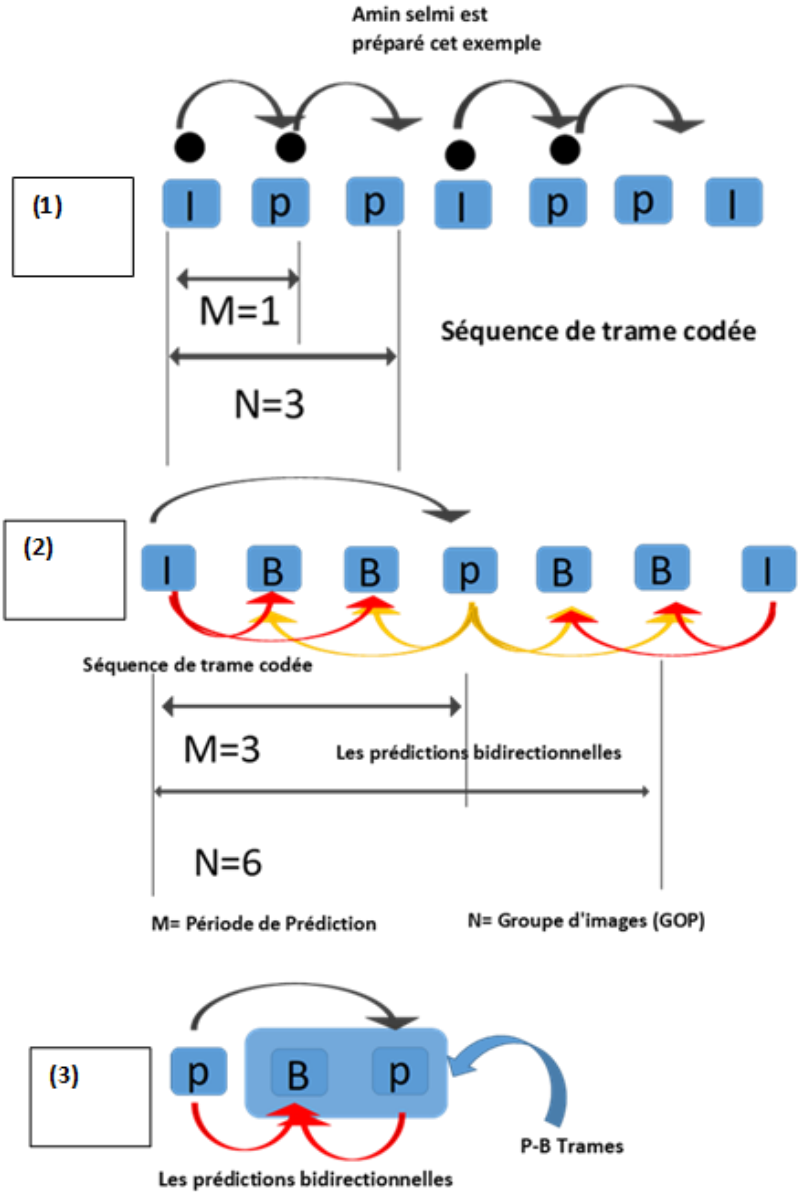


Figure 14 : Schéma illustre les possibilités des frames séquence.

II.4.4 Format bit Stream basic:

Type de trame : précise s'il s'agit d'une trame I, P ou B.

- Indication d'adresse : définit la position précise du macrobloc au sein du cadre.
- Seuil de quantification : valeur de référence appliquée pour quantifier l'intégralité des coefficients DCT du macrobloc.

- Vecteur de mouvement : représentation du vecteur sous forme codée.
- Présence de bloc : signale les blocs effectivement présents dans le macrobloc.

Voici les taux de compression habituellement constatés selon le type de trame :

- Trames I : de 10:1 à 20: 1.
- Trames P : de 20:1 à 30: 1.
- Trames B : de 30:1 à 50: 1. [1]

II.5 Format H.261

H.261 est une norme de compression vidéo utilisée pour les appels en vidéo. Elle a été définie pour transmettre des images animées à des débits compris entre 64 Kbps et environ 2 Mbps.

Cette norme convient aux réseaux à commutation de circuits, souvent employés pour la transmission à débit constant. Elle repose sur deux types d'images, les images complètes et les images basées sur les différences avec l'image précédente.

Format de codage:

- Type: indique si le macrobloc est codé ou inter-codé
- Adresse: identifie l'emplacement du macrobloc dans le cadre
- Valeur de quantification: la valeur de seuil utilisée pour quantifier tous les coefficients DCT dans le macrobloc.
- vecteur de mouvement: vecteur codé
- Modèle de bloc codé: indique quel bloc dans le macrobloc est présent
- Code de début d'image: indique le début d'une nouvelle image.

- Référence temporelle: un horodatage pour le décodeur pour synchroniser les informations vidéo avec les informations audio.
- Type d'image: indique si la trame est codée en tant que cadre I ou P.
- Code de début GOB: est un marqueur de resynchronisation qui est utilisé pour la resynchronisation en cas d'erreur.
- Le groupe de bloc (macro) (GOP) est une structure composée de macroblocs 3x11.[1]

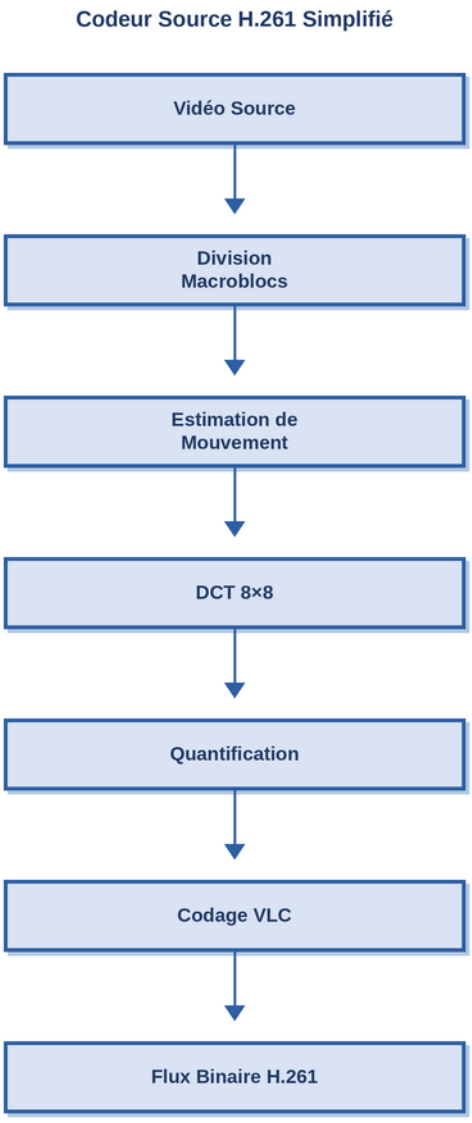


Figure 15 : la Structure bit Stream du format H261.

II.6 Format H.263

La norme H.263 a été spécifiquement élaborée pour répondre aux besoins des applications de codage fonctionnant à de très bas débits. Pour le processus d'encodage, elle s'appuie sur une structure de transformée en cosinus discrète (DCT) associée à des blocs compensés. [4]

Développé par l'Union Internationale des Télécommunications (UIT), ce standard de compression vidéo pour la téléconférence est optimisé pour les services de vidéo conversationnelle à faible débit binaire.

- Le secteur de la normalisation des télécommunications de l'UIT (UIT-T) a défini le H.263 pour une utilisation dans diverses applications vidéo en temps réel, notamment sur les réseaux téléphoniques commutés publics (RTPC) et les réseaux sans fil.

- Parmi ses champs d'application, on retrouve la visioconférence, la téléphonie vidéo, les jeux interactifs ainsi que la surveillance de sécurité.

- Comparée à la norme H.261, la norme H.263 propose plusieurs options d'encodage plus sophistiquées :

- Utilisation du balayage progressif avec des fréquences de rafraîchissement de 7,5 ou 15 images par seconde (fps).

- Prise en charge des trames de type I, P, B et PB.

- Possibilité pour les vecteurs de mouvement de pointer en dehors des limites du cadre si nécessaire.

- L'intégration de schémas tels que la sélection de l'image de référence, le suivi des erreurs et le décodage indépendant des segments, afin de limiter l'impact des erreurs sur les groupes de blocs (GOB) adjacents.

- Enfin, un mécanisme de dissimulation d'erreur est intégré au décodeur pour rendre les défauts de transmission invisibles pour le spectateur. [1]

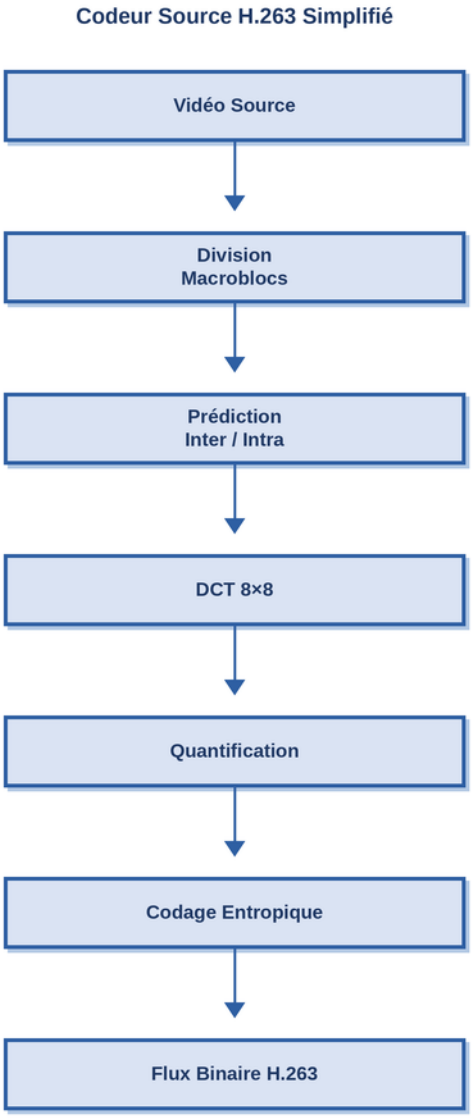


Figure 16: codeur source du format H.263

II.7 Format H264 /AVC

II.7 Le standard H.264 / AVC

Également connu sous l'appellation MPEG-4 Part 10, le standard H.264 (ou Advanced Video Coding) représente l'une des avancées majeures en matière de codage vidéo. Cette norme a été élaborée à travers une collaboration étroite entre le Groupe d'experts du codage vidéo de l'UIT-T (VCEG) et le groupe d'experts Moving Picture (MPEG) de l'ISO/IEC.[5]

Considéré aujourd'hui comme l'un des codecs les plus répandus, le H.264 s'impose comme une solution de compression privilégiée pour les flux en haute définition (HD). Sa capacité à maintenir une excellente qualité visuelle même avec des débits binaires restreints justifie son utilisation massive dans des technologies telles que la TVHD, le Blu-ray, le HD DVD ou encore les caméscopes AVCHD. Il est à noter que le format conteneur MP4 (.mp4) est fréquemment employé pour encapsuler des flux vidéo encodés selon cette norme. [1]

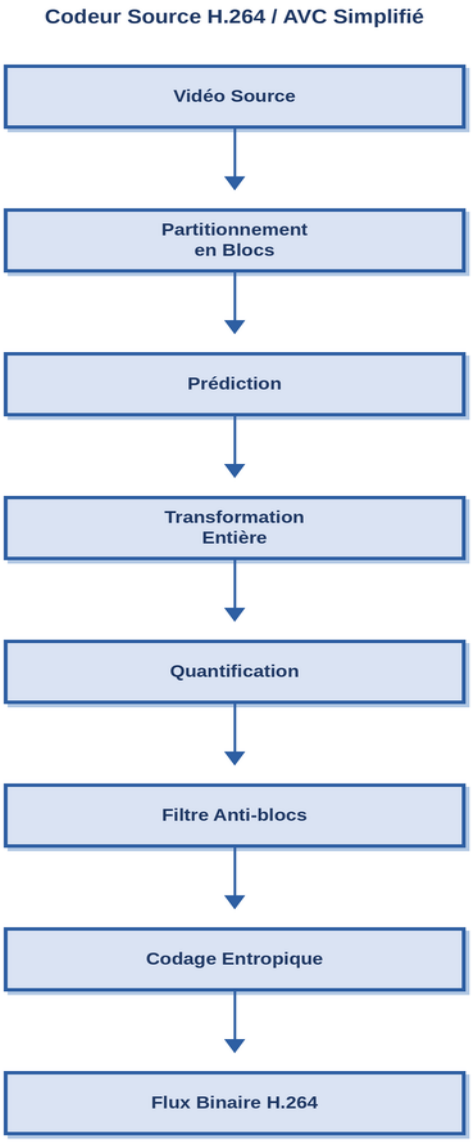


Figure 17: Diagramme de bloc de codeur H.264.

II.8 Format H265/ HEVC

La norme de codage vidéo haute efficacité (HEVC) est le plus récent projet vidéo commun du Groupe d'experts du codage vidéo UIT-T (VCEG) et des organisations de normalisation MPEG (ISO / IEC Moving Picture Experts Group), travaillant ensemble dans un partenariat connu sous le nom de L'équipe collaborative conjointe sur le codage vidéo (JCT-VC) [6]. Il prend en charge les résolutions jusqu'à 8192 × 4320, y compris 8K UHD

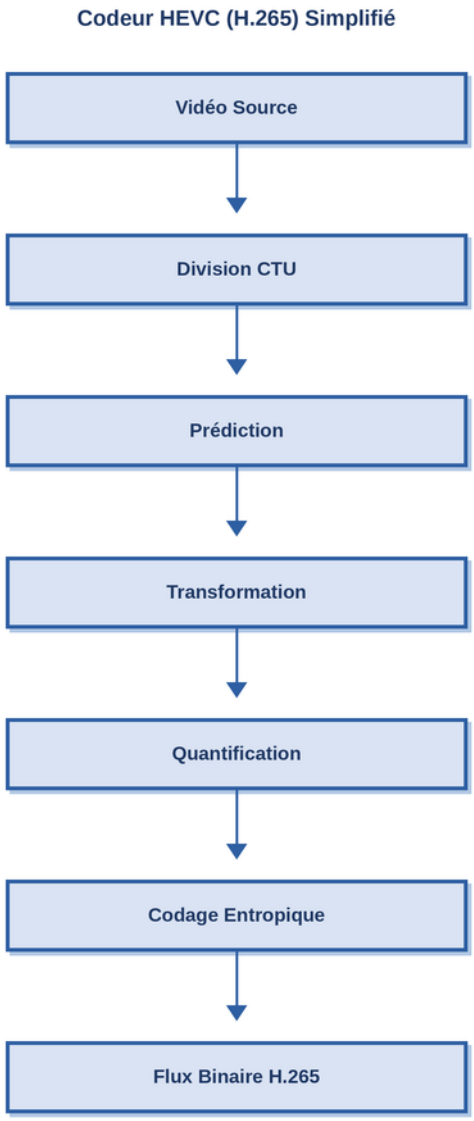


Figure 18 : Schéma de principe du codeur HEVC.

HEVC a été conçu pour offrir une efficacité de compression deux fois plus élevée que H.264. Les résultats peuvent varier selon le type de vidéo et les réglages choisis.

Dans les conditions courantes, HEVC réduit la taille des fichiers d'environ moitié pour une qualité d'image similaire. À taille égale, il permet aussi d'obtenir une meilleure qualité d'image que H.264. [1]

Standard	Année	Organisme	Résolutions Cibles	Débits Typiques	Caractéristiques Principales
H.261	1990	ITU-T	CIF (352 x 288)	64 kbit/s à 2 Mbit/s	Pionnier de la visioconférence. Introduction des macroblocs rigides de 16 x 16.
H.262	1995	ITU-T & ISO/IEC	SD (480i, 576i)	4 à 15 Mbit/s	Standard officiel du format DVD-Vidéo et de la Télévision Numérique Terrestre (TNT).
H.263	1996	ITU-T	QCIF, CIF	< 64 kbit/s	Optimisé pour le streaming bas débit sur lignes RTC et premiers réseaux mobiles (3GP).
H.264 (AVC)	2003	ITU-T & ISO/IEC JVT	HD (720p, 1080p)	1 à 20 Mbit/s	Standard universel (YouTube, Blu-ray, TV HD). Débit réduit de 50% par rapport au H.262 à qualité égale.
H.265 (HEVC)	2013	ITU-T & ISO/IEC JCT-VC	4K UHD, 8K	Réduction de ~50% vs H.264	Adapté aux flux Ultra HD. Introduction des CTU complexes (jusqu'à 64 x 64). Très lourd en calcul.

Tableau 3 : Tableau comparative entre les codecs

II.10 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les anciennes et les nouvelles méthodes de compression vidéo. On constate qu'elles ont évolué étape par étape. Chaque méthode cherche à réduire la taille des fichiers tout en gardant une bonne qualité d'image, avec le moins de perte possible.

Troisième chapitre

Les réseaux hauts débit

III.1 introduction :

Avec l'augmentation du transfert de données, surtout pour les contenus multimédias, les réseaux hauts débit sont devenus indispensables. Ils assurent un échange rapide et stable des informations. Ils répondent aux besoins liés à la vitesse et à la qualité de transmission.

Les réseaux sans fil haut débit occupent aussi une place importante. Ils offrent une connexion mobile et flexible avec de bonnes performances. Ils sont présents dans les usages personnels et professionnels.

Ce chapitre présente les principes des réseaux haut débit, leurs technologies principales et leurs avantages, avec un intérêt particulier pour les réseaux sans fil.

III.2. Les Réseaux Haut Débit

III.2.1 Définition des Réseaux Haut Débit

Une infrastructure de communication est qualifiée de réseau haut débit lorsqu'elle possède la capacité d'acheminer des volumes massifs de données avec une célérité importante. D'après les critères établis par l'Union internationale des télécommunications (UIT), le seuil du haut débit est fixé à partir de 256 Gbps, une valeur qui s'avère aujourd'hui largement obsolète face aux besoins actuels. [7]

De nos jours, cette terminologie englobe plus couramment des liaisons excédant les 10 Mbps, pouvant même atteindre plusieurs gigabits par seconde pour les infrastructures les plus performantes. [8]

III.2.2. Caractéristiques des Réseaux Haut Débit

Un réseau haut débit de qualité repose sur quatre critères fondamentaux :

- **Un débit élevé :** Exprimé en bits par seconde (bit/s), il détermine la vitesse de transmission des données. Un volume élevé est indispensable pour supporter sans ralentissement des usages gourmands comme le streaming de haute définition ou le téléchargement de fichiers volumineux.

- **Une faible latence :** Elle correspond au temps de réponse du réseau (le délai d'aller-retour des données). Pour garantir la réactivité des applications en temps réel — telles que les visioconférences ou les jeux en ligne —, cette latence doit idéalement rester en dessous de la barre des 100 millisecondes (ms).
- **Une excellente fiabilité :** Au-delà de la vitesse, le réseau doit offrir une connectivité stable et continue. Une infrastructure robuste minimise les pertes de signal et évite les déconnexions intempestives.
- **La Qualité de Service (QoS) :** Ce mécanisme permet de hiérarchiser le trafic selon la nature des données. À titre d'exemple, le réseau peut donner la priorité aux flux vidéo et de voix sur les téléchargements de fichiers, garantissant ainsi une expérience utilisateur fluide et sans coupure pour les services critiques. [8]

III.2.3. Technologies Haut Débit

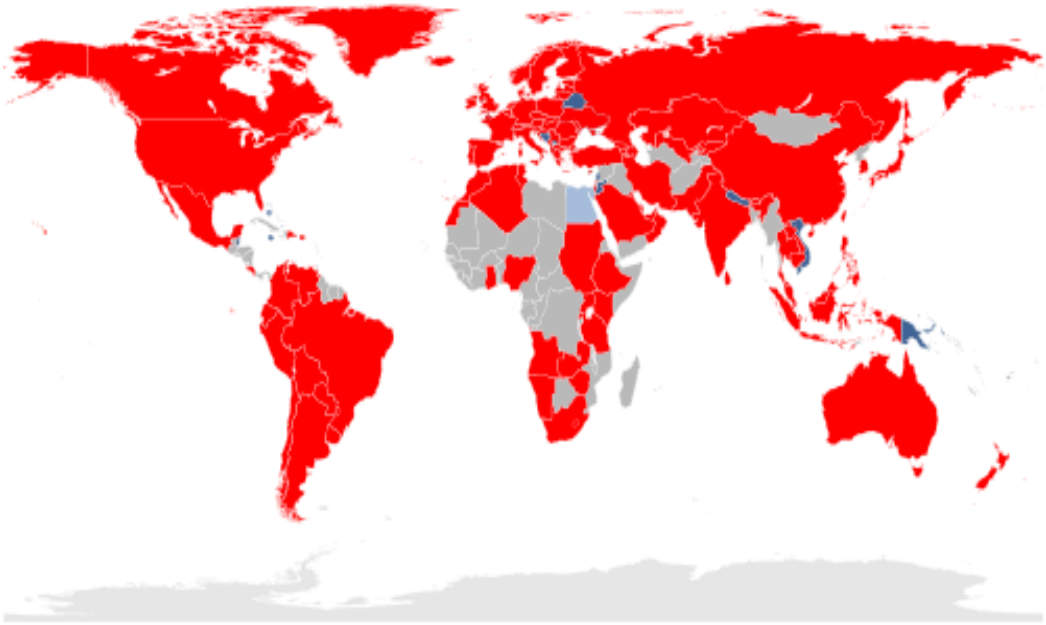
III.2.3.1. Réseaux Sans Fil

III.2.3.1.1. Quatrième génération de réseaux mobiles (4G)[10]

A. Définition de réseau 4G (LTE)

Succédant à la technologie 3G, la 4G (quatrième génération de réseaux mobiles) représente une avancée majeure dans les communications sans fil. Elle a été spécifiquement élaborée pour fournir une connectivité internet mobile à très haut débit, répondant ainsi à l'explosion de la consommation de données multimédias, telles que le streaming vidéo haute définition, la navigation web instantanée, les visioconférences ou encore le cloud gaming.

Sur le plan technique, cette génération s'appuie principalement sur le standard LTE (Long Term Evolution). Pour atteindre des performances encore plus élevées, elle peut également exploiter la norme LTE-Advanced, qui optimise significativement les débits de transfert. [9]



Réseaux commerciaux.
Réseaux en cours de déploiement.
Réseaux en test.

Figure 21 : les Pays équipés de réseaux LTE en 2018 **[2]**

B. Principales caractéristiques techniques

Caractéristique	Valeur typique (LTE)
Débit descendant (download)	Jusqu'à 150 Mbps (LTE) / 1 Gbps (LTE-A)
Débit montant (upload)	Jusqu'à 50 Mbps (LTE)
Latence	Entre 30 et 50 ms
Bande de fréquence	800 MHz, 1800 MHz, 2600 MHz
Type d'accès	Packet-switching (IP)
Mobilité	Excellente, fonctionne en déplacement rapide

Tableau.4 : Les Principales caractéristiques techniques [2]

C. Architecture

L'infrastructure de la 4G s'appuie sur un modèle entièrement fondé sur le protocole IP (Internet Protocol), où l'ensemble des communications transite par le web. Son déploiement repose sur un maillage d'antennes relais assurant une couverture sur de vastes étendues territoriales. Ces installations sont reliées à un cœur de réseau évolué qui pilote les échanges, garantit la fluidité du trafic et régule l'accessibilité aux contenus multimédias. [9]

III.2.3.1.2.Cinquième génération de réseaux mobiles (5G)

Succédant à la 4G, la technologie 5G constitue une avancée majeure conçue pour délivrer des débits nettement supérieurs et une réactivité quasi instantanée, avec une latence réduite à environ une milliseconde. Grâce à l'exploitation de nouvelles plages de fréquences, notamment les ondes millimétriques, elle permet d'atteindre des vitesses de transfert théoriques de plusieurs gigabits par seconde tout en supportant une densité de connexion d'appareils bien plus élevée. Cette infrastructure est devenue un pilier fondamental pour le développement d'innovations telles que l'Internet des objets (IoT), les véhicules connectés ainsi que les expériences immersives en réalité virtuelle et augmentée.[5]

III.2.3.1.3.Wifi

La technologie Wi-Fi facilite les échanges de données sans fil sur de courtes distances, couvrant habituellement un périmètre de quelques dizaines de mètres. Très répandue, on la retrouve aussi bien dans le cadre domestique et professionnel que dans les espaces publics tels que les aéroports ou les établissements de restauration. Le fonctionnement du Wi-Fi repose sur l'utilisation des bandes de fréquences de 2,4 GHz et 5 GHz, permettant ainsi d'atteindre des débits de transmission élevés. Au fil de ses évolutions, les standards récents comme le Wi-Fi 5 et le Wi-Fi 6 ont apporté des améliorations significatives, notamment en termes de rapidité de transfert et de capacité à gérer simultanément de multiples connexions.[10]

A. Les standards IEEE 802.11

Publiée initialement en 1997, la norme IEEE 802.11 a été conçue par l'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Ce standard établit les fondements techniques des réseaux locaux sans fil (WLAN), en se concentrant spécifiquement sur les paramètres de la couche physique (PHY) ainsi que sur le fonctionnement de la sous-couche de contrôle d'accès au support (MAC).

.Le tableau ci-dessous présente les principaux standards IEEE relatifs aux réseaux sans fil [6]

Standard	Année de ratification	Description
IEEE 802.11	1997	Première version, débit de 1 à 2 Mbps sur la bande 2.4 GHz.
IEEE 802.11b	1999	Extension à 11 Mbps, popularisation du Wi-Fi.
IEEE 802.11a	1999	Fonctionne sur la bande 5 GHz, jusqu'à 54 Mbps, mais moins adopté initialement.
IEEE 802.11g	2003	Combine les avantages de a et b, 54 Mbps sur 2.4 GHz.
IEEE 802.11n (Wi-Fi 4)	2009	Introduit le MIMO, double bande (2.4 et 5 GHz), jusqu'à 600 Mbps.
IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5)	2013	Débits multi-Gbps, MU-MIMO, 80/160 MHz, 5 GHz uniquement.
IEEE 802.11ax	2019	Améliore l'efficacité et la capacité, supporte les bandes 2.4 et 5 GHz, jusqu'à 9.6 Gbps.
IEEE 802.11be (Wi-Fi 7)	Prévu pour 2024–2025	Supporte les bandes 2.4, 5 et 6 GHz, MLO, débit théorique >30 Gbps.

Tableau 5: les principaux standards IEEE relatifs aux wifi [2]

B .Architecture d'un réseau Wi-Fi

La structure d'un réseau Wi-Fi repose sur une configuration spécifique autorisant les échanges sans fil entre divers terminaux par l'intermédiaire d'un ou de plusieurs points d'accès. Cette architecture se décline en différentes catégories,

déterminées par la méthode de connexion des équipements et les modalités de partage des flux de données.

C.Points d'accès (Access Points – AP)

Le point d'accès Wi Fi relie un réseau câblé aux appareils sans fil. Il transmet les données entre le réseau et les équipements connectés en assurant l'émission et la réception des signaux radio.

Dans les réseaux d'entreprise, les points d'accès sont reliés à un système central qui gère les ressources, la sécurité et les déplacements des appareils connectés.

Dans les réseaux domestiques, le routeur Wi Fi remplit souvent le rôle de point d'accès et assure aussi l'accès à Internet.

D.Topologies Wi-Fi

On distingue généralement deux configurations structurelles majeures pour les réseaux Wi-Fi:

- **Topologie infrastructurelle :**

Il s'agit de l'architecture la plus répandue dans les réseaux sans fil. Les équipements, tels que les ordinateurs, les smartphones et les capteurs, se connectent à un ou plusieurs points d'accès reliés à un réseau filaire. Cette organisation centralisée facilite l'administration du réseau, améliore la sécurité et permet une meilleure gestion des échanges de données .[11]

- **Topologie ad hoc (peer-to-peer) :**

Dans cette configuration, les équipements échangent directement des données entre eux sans passer par un point d'accès. Ce mode de fonctionnement est généralement adopté pour des connexions temporaires ou lorsqu'aucune infrastructure réseau n'est disponible. Un exemple courant est le transfert de fichiers entre deux ordinateurs reliés directement .[11]

c) Clients Wi-Fi

On définit les clients Wi-Fi comme l'ensemble des terminaux répondant aux normes 802.11 et aptes à s'intégrer à un réseau sans fil. Cette catégorie regroupe notamment :

- Le matériel informatique mobile : tablettes, smartphones et ordinateurs portable;
- L'Internet des objets (IoT) : dispositifs domotiques, caméras et capteurs divers ;
- Les équipements multimédias : consoles de jeux, téléviseurs connectés et imprimantes sans fil.

Équipé d'une interface radio, chaque client peut identifier les points d'accès à proximité (en utilisant les protocoles WPA/WPA2/WPA3) et réaliser des transferts de données sur les plages de fréquences réglementées.

C. Protocoles de sécurité de Wi-Fi

Protocole	**Année d'introduction**	**Type de chiffrement**	**Clé Authentification**	**Vulnérabilités connues**	**Niveaude sécurité**
WEP	1997	RC4 (128 bits max)	Clé partagée (statique)	Très vulnérable (attaque FMS, clés faciles à casser)	Faible
WPA	2003	TKIP + RC4	Clé pré-partagée (WPA-Personal)	TKIP cassable, vulnérable à certaines attaques	Moyen
WPA2	2004	AES-CCMP (remplace TKIP)	WPA-Personal / WPA-Enterprise	Vulnérable à KRACK (corrigé via mises à jour)	Bon

WPA3	2018	AESGCMP-256 + SAE (Dragonfly)	Authentification renforcée (SAE)	Résistance aux attaques par dictionnaire hors ligne	Très élevé

Tableau 6: Comparaison des protocoles de sécurité Wi-Fi [2]

- Les protocoles WEP et WPA ne sont plus adaptés aux exigences de sécurité actuelles.
- Bien qu'encore majoritaire, le WPA2 nécessite des correctifs impératifs contre les failles comme KRACK.
- Le WPA3 s'impose désormais comme le standard le plus robuste, privilégié sur le matériel récent.

III.2.3.1.4. Les Avantages des réseaux sans fil (Wi-Fi, 4G, 5G)

Le tableau suivant présente les principaux avantages des réseaux sans fil.

Avantage	Description
Mobilité	Permettent une connexion depuis n'importe quel endroit dans la zone de couverture (ex. : déplacement avec un smartphone ou un ordinateur portable).
Moins d'infrastructure physique	Pas besoin de câbles entre les appareils, ce qui réduit les coûts et facilite l'installation.
Installation rapide	Mise en place plus rapide, surtout dans les zones difficiles d'accès.
Connexion simultanée d'appareils multiples	Plusieurs utilisateurs peuvent se connecter au même réseau sans encombrer l'espace.

Tableau 7 : Les points forts des réseaux sans fil [2]

III.2.3.1.5. Inconvénients des réseaux sans fil (Wi-Fi, 4G, 5G)

Le tableau ci-dessous synthétise les principaux inconvénients des réseaux sans fil

Inconvénients	Description
Instabilité du signal	Sensibles aux interférences, obstacles physiques (murs), ou distance par rapport au point d'accès.
Sécurité	Plus vulnérables aux intrusions et attaques si les mesures de sécurité ne sont pas bien mises en place.
Débit variable	Le débit peut être plus faible que celui d'un réseau filaire, surtout en cas de congestion.
Consommation d'énergie	Les dispositifs sans fil (modems, routeurs, etc.) peuvent consommer plus d'énergie.

Tableau.8 : Les Inconvénients des réseaux sans fil [2]

III.2.3.2. Réseaux filaires haut débit

III.2.3.2.1. Presentation des Réseaux Filaire

Basés sur l'utilisation de supports matériels tels que la fibre optique ou les câbles Ethernet, les réseaux filaires à haut débit garantissent une rapidité de transfert et une stabilité de connexion optimales. Ces infrastructures sont omniprésentes dans les milieux domestiques, professionnels et industriels, où elles facilitent notamment l'échange de flux multimédias volumineux.

Technologies ADSL/VDSL : exploitant l'infrastructure des lignes téléphoniques en cuivre, l'ADSL fournit des débits pouvant atteindre 20 Mbps. Le VDSL, quant à lui, peut grimper jusqu'à 100 Mbps, bien que sa performance dépende de la proximité de l'usager par rapport au commutateur central.

La Fibre optique : reconnue comme la technologie de pointe, elle assure des débits symétriques atteignant couramment 1 Gbps.

Grâce à des normes comme le XGS-PON, elle peut même offrir jusqu'à 10 Gbps avec un temps de latence extrêmement réduit. [12]

III.2.3.2.2. Technologies principales

Les réseaux filaires haut débit reposent sur deux principales technologies, le câble Ethernet en cuivre et la fibre optique. Chaque technologie a ses propres caractéristiques. Elles influencent la vitesse, le coût et les domaines d'utilisation.

A. Câble en cuivre (Ethernet)

Le câble Ethernet, composé de paires de fils de cuivre torsadées, reste l'un des supports les plus répandus dans les réseaux locaux. L'évolution des normes Ethernet a permis d'augmenter progressivement les débits de transmission.

La catégorie 5 prend en charge des débits allant jusqu'à 1 Gbit/s sur une distance maximale de 100 mètres.

La catégorie 6 permet d'atteindre 10 Gbit/s sur une distance pouvant aller jusqu'à 55 mètres.

La catégorie 6a conserve un débit de 10 Gbit/s sur une distance maximale de 100 mètres.

Les catégories 7 et 8 sont destinées aux transmissions à haut débit. La catégorie 8 peut atteindre jusqu'à 40 Gbit/s sur des distances plus courtes.

Le câble cuivre est largement adopté en raison de son coût modéré, de sa simplicité d'installation et de sa compatibilité avec la majorité des équipements réseau. Sa principale limite réside dans sa sensibilité aux perturbations électromagnétiques, qui peuvent affecter la qualité de transmission dans certains environnements. [13]

B. **Fibre optique** :

- La fibre optique présente plusieurs avantages pour la transmission des données.

- Elle prend en charge des débits élevés grâce à des techniques telles que le multiplexage en longueur d'onde. Cette technologie permet de transporter de grandes quantités de données sur une même fibre.
- Elle assure la transmission des signaux sur de longues distances, souvent sur plusieurs kilomètres, avec une faible atténuation du signal.
- Elle est insensible aux perturbations électromagnétiques. Cette caractéristique garantit une transmission stable, même dans les environnements industriels.
- Elle offre également une faible latence, ce qui favorise les applications nécessitant des échanges rapides de données.
- On distingue principalement deux types de fibres optiques.
- Les fibres monomodes sont adaptées aux transmissions sur de longues distances et aux réseaux de grande envergure.
- Les fibres multimodes sont destinées aux liaisons de courte distance, notamment dans les réseaux locaux.

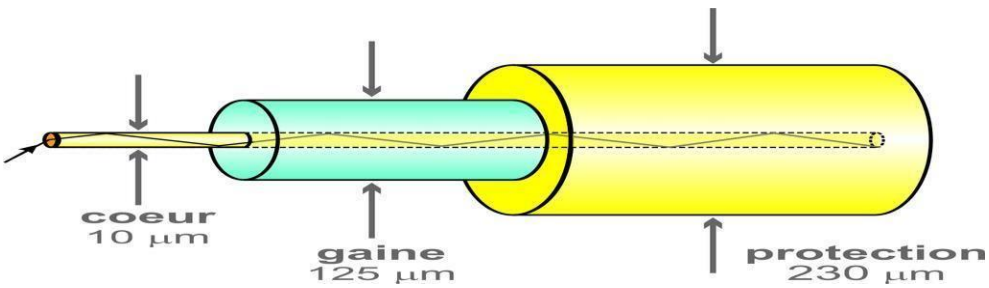


Figure III.22 : structure d'une fibre optique.

B. **Autres technologies filaires**

Dans certains cas, d'autres technologies filaires peuvent être utilisées, notamment :

- Le câble coaxial est un ancien type de câble utilisé pour la télévision par câble et certains réseaux locaux.

- Le réseau électrique permet aussi de transmettre des données à travers les lignes électriques d'une maison. Cette solution reste limitée en vitesse et en stabilité.

III.2.3.2.3.Principe de fonctionnement

Dans un réseau filaire, les données sont transmises sous forme de signaux électriques (dans le cas des câbles en cuivre) ou optique (dans le cas de la fibre optique). Ces signaux circulent à travers des câbles reliant physiquement les nœuds du réseau. La communication se fait donc de manière directe, continue et stable, avec peu ou pas de perturbations extérieures.

L'architecture en étoile constitue généralement la base du fonctionnement de ces réseaux. Dans cette configuration, chaque équipement est raccordé à un nœud central, tel qu'un routeur ou un commutateur, ce qui assure une gestion fluide et une transmission accélérée des flux d'informations.

Ce modèle d'infrastructure est idéalement conçu pour les contextes exigeant :

- Une capacité de débit importante ;
- Un haut niveau de sécurité des échanges ;
- Une liaison constante, protégée des perturbations externes.

Par conséquent, la connectivité filaire s'impose comme le choix préférentiel pour les usages essentiels, notamment le partage de données multimédias massives, la diffusion en haute résolution ou les interactions professionnelles instantanées. [13]

III.2.3.2.4. Avantages et Inconvénients des réseaux filaires (Ethernet, fibre optique, etc.)

Le tableau suivant présente les principaux avantages des réseaux filaires.

Avantages	Description
Stabilité et fiabilité	Connexion stable, peu sujette aux interférences ou à la perte de signal.
Débit élevé et constant	Vitesse de transfert généralement plus rapide et constante, surtout avec la fibre optique.
Sécurité renforcée	Sécurité renforcée

Tableau. 9: Les Avantages des réseaux filaires [2]

Le tableau suivant présente les principaux inconvénients des réseaux filaires.

Inconvénients	Description
Manque de mobilité	Les utilisateurs doivent être physiquement connectés, ce qui limite les déplacements.
Installation complexe	Nécessite des câbles, des prises réseau, voire des travaux dans les bâtiments.
Coût d'installation	L'installation initiale peut être plus coûteuse, surtout pour de grandes structures.

Tableau 10 : Les Inconvénients des réseaux filaires [2]

III.2.3.2.5.Limites des réseaux filaires haut débit

Bien qu'offrant de multiples atouts, les infrastructures filaires à haut débit comportent également des contraintes spécifiques. Une compréhension approfondie de ces limitations est fondamentale pour sélectionner la solution technologique répondant le mieux aux exigences d'un projet donné.

A. Mobilité limitée

La nécessité d'une liaison matérielle par câblage constitue l'un des principaux points faibles des infrastructures filaires. Cette dépendance restreint considérablement la liberté de mouvement des usagers et du matériel, contraints de demeurer à proximité d'un connecteur fixe. Pour des milieux exigeant une grande souplesse et une mobilité fluide, tels que les espaces de travail contemporains, les lieux publics ou les usages nomades, cette limitation représente un obstacle significatif. [14]

B. Coût d'installation et de déploiement

L'implantation d'une infrastructure filaire, en particulier lorsqu'elle repose sur la fibre optique, peut exiger un investissement de départ conséquent. La réalisation des travaux (pose des câbles, raccordements, passage en gaines) s'avère chronophage et requiert des expertises techniques pointues. Par ailleurs, des démarches administratives pour l'obtention d'autorisations sont souvent nécessaires, principalement pour le déploiement de réseaux à large échelle.

En outre, les frais de raccordement à la fibre peuvent devenir excessivement onéreux dans certaines régions géographiques isolées ou mal desservies. [14]

C. Maintenance et réparations

Les réseaux câblés imposent souvent des interventions matérielles directes sur les infrastructures en cas de défaillance. Lorsque les câbles sont localisés dans des zones à l'accessibilité restreinte, comme des conduits techniques denses ou des structures enfouies, les travaux de remise en état peuvent provoquer des arrêts de service durables.

En outre, l'identification des pannes s'avère parfois complexe, car une altération physique du support peut demeurer indétectable jusqu'à ce que des dysfonctionnements majeurs ne se manifestent.

D. Limites physiques liées au support

- **Distance maximale** : En raison d'une portée maximale limitée à environ 100 mètres pour l'Ethernet standard, les câbles en cuivre nécessitent le déploiement de répéteurs ou de commutateurs intermédiaires dès lors qu'il s'agit de couvrir de plus longues distances.
- **Fragilité de la fibre optique** : même si très performante, la fibre optique est plus fragile que le cuivre et nécessite des précautions particulières lors de la pose et de la manipulation pour éviter les cassures. [15]

E. Adaptabilité

Les infrastructures filaires se révèlent moins adaptables face aux besoins d'évolution ou d'extension. En effet, connecter de nouveaux appareils ou modifier l'agencement existant implique généralement la mise en œuvre de travaux de câblage additionnels.

III.2.3.2.6.Applications des réseaux filaires haut débit

Les réseaux filaires haut débit sont présents dans plusieurs domaines grâce à leur stabilité, leur vitesse et leur sécurité. Voici quelques exemples d'utilisation.

A. Réseaux locaux d'entreprise (LAN)

Dans les entreprises, les réseaux Ethernet sont largement déployés pour relier les postes de travail, les serveurs, les imprimantes et les autres équipements informatiques. Cette infrastructure assure un accès rapide et sécurisé aux ressources partagées, telles que les bases de données et les applications professionnelles [16].

Exemple. Dans un bureau regroupant plusieurs employés, un réseau Ethernet de 10 Gbit/s facilite l'échange de fichiers de grande taille, le déroulement des appels vidéo et l'accès aux serveurs internes de l'entreprise.

B. Centres de données (Data Center)

L'usage massif de la fibre optique dans les centres de données garantit une interconnexion véloce entre les serveurs, les systèmes de stockage et les infrastructures réseaux externes. Cette technologie est cruciale pour le traitement de flux de données massifs tout en maintenant une latence extrêmement réduite. [17]

Exemple : Un centre de données utilise des connexions en fibre optique de 100 Gbps pour fournir des services en ligne, héberger des applications et stocker les données des clients à grande échelle.

C. Réseaux domestiques haut débit

Au sein de l'environnement domestique, le recours aux câbles Ethernet est fréquent pour l'interconnexion des boîtiers internet, des consoles de divertissement, des téléviseurs connectés et des stations de travail individuelles, garantissant ainsi une connectivité réseau à la fois constante et performante.. [18]

Exemple : Un utilisateur relie son ordinateur et sa télévision intelligente avec un câble Ethernet pour regarder une vidéo en 4K sans coupure.

D. Réseaux télécoms et interconnexions longues distances

Élément central des infrastructures de télécommunications modernes, la fibre optique constitue la technologie fondamentale pour le transport des flux internet à l'échelle mondiale, reliant les zones urbaines ainsi que les continents par le biais de câbles sous-marins. Sa mise en œuvre garantit non seulement des bandes passantes extrêmement larges, mais également une stabilité de connexion irréprochable. [19]

Exemple : Le réseau national de fibre optique relie les grandes villes entre elles. Il permet aux fournisseurs d'accès de proposer une connexion internet à haut débit.

E. Applications industrielles

Au sein du secteur industriel et des usines intelligentes, les infrastructures filaires jouent un rôle prépondérant en facilitant l'interconnexion entre les automates programmables, les capteurs et les dispositifs de pilotage. Cette architecture réseau assure une circulation fluide et sécurisée des informations stratégiques, tout en offrant la fiabilité et la rapidité nécessaires aux processus automatisés.. [19]

Exemple : Une ligne de production utilise un réseau Ethernet industriel pour synchroniser en temps réel les machines et le contrôle de qualité.

III.2.3.2.7.Caractéristiques spécifiques des réseaux sans fil

Les réseaux sans fil possèdent des attributs particuliers qui agissent sur leur architecture, leur mise en œuvre ainsi que leur efficacité. La mobilité, la sécurité et la vulnérabilité aux interférences comptent parmi leurs caractéristiques les plus déterminantes.. [21]

A. Mobilité

La mobilité représente l'un des atouts prépondérants des infrastructures sans fil. À l'inverse des configurations filaires, elle offre aux usagers la liberté de se mouvoir tout en maintenant une connectivité constante, sous réserve de rester dans le périmètre de couverture. Cet avantage s'avère crucial au sein d'environnements évolutifs comme les centres hospitaliers, les campus ou les espaces collaboratifs. Cette continuité de service durant les déplacements est garantie par des protocoles spécifiques et des processus de handover, assurant la transition fluide entre les points d'accès.. [22]

B. Sécurité

La sécurisation des transmissions constitue une problématique centrale pour les infrastructures sans fil. Contrairement aux liaisons filaires, la propagation des

signaux dans un environnement ouvert facilite l'interception des flux de données, exposant ainsi le réseau à des risques accrus d'espionnage (eavesdropping), d'intrusions malveillantes ou d'attaques par déni de service (DoS). Pour contrer ces menaces, le déploiement de protocoles de chiffrement robustes, tels que le WPA2 et le WPA3, est essentiel. En complément, l'adoption de l'authentification forte et le recours aux réseaux privés virtuels (VPN) permettent de garantir l'intégrité des informations, particulièrement dans les contextes professionnels exigeants. [23]

C. Sensibilité aux interférences

La vulnérabilité aux interférences constitue une caractéristique majeure des réseaux sans fil, impactant directement la qualité du signal et, par extension, l'efficacité globale du réseau. Divers facteurs peuvent être à l'origine de ces perturbations, notamment le rayonnement d'appareils électroniques domestiques (tels que les fours à micro-ondes ou la téléphonie sans fil), la proximité d'autres réseaux opérant sur des fréquences identiques, ou encore la présence de contraintes physiques comme les parois et le mobilier. En outre, la fiabilité des échanges de données sans fil est fréquemment compromise par des phénomènes de fading (affaiblissement du signal) ainsi que par le bruit ambiant (noise). [28]

2.4.Critères de performance des réseaux hauts débit

Les services multimédias actuels, tels que Netflix, YouTube ou Zoom, exigent des infrastructures réseau capables d'assurer des standards de performance rigoureux pour garantir une expérience utilisateur fluide. Pour satisfaire ces exigences, un réseau à haut débit se doit de fournir les garanties suivantes :[7] [8] [24]

- La fourniture d'un débit stable et permanent, avec des valeurs de référence comme 25 Mbps pour la diffusion de contenus en ultra-haute définition (4K).
- Le maintien d'une latence réduite, idéalement sous le seuil des 50 ms, paramètre critique pour la réactivité des jeux vidéo en ligne et la clarté des communications vocales.
- Une gigue (jitter) minimale afin d'assurer une régularité constante dans le délai de transmission des paquets de données.

- Un taux de perte de paquets extrêmement bas pour prévenir toute interruption de flux ou dégradation de la qualité visuelle et sonore.

En somme, la capacité d'un réseau à offrir ces niveaux de service est déterminante pour accompagner l'évolution des usages numériques et répondre aux attentes croissantes des utilisateurs.

3.5. Applications multimédia et leur besoin en haut débit

Les applications multimédias regroupent plusieurs services numériques qui transmettent et affichent du son, de la vidéo ou des contenus interactifs. Elles demandent des performances réseau élevées pour assurer une bonne qualité d'utilisation pour l'utilisateur.

- **Streaming audio et vidéo**

Pour garantir une lecture fluide et sans coupure, les services de streaming tels que YouTube, Spotify ou Netflix exigent une bande passante adéquate, évitant ainsi les interruptions liées à la mise en mémoire tampon.. [25]

- **Visioconférence**

Les plateformes de communication en temps réel telles que Zoom, Google Meet ou Microsoft Teams nécessitent une bande passante constante et une latence réduite (souvent inférieure à 150 ms) pour assurer des échanges fluides.

·Qualité HD avec partage d'écran : entre 1,5 et 3 Mbps

·Communication vocale uniquement : de 60 à 100 kbps [26]

- **Jeux en ligne (cloud gaming)**

Les divertissements interactifs, qu'il s'agisse de jeux en réseau ou de cloud gaming via des plateformes comme GeForce Now ou Xbox Cloud, présentent une forte sensibilité aux variations de gigue et à la latence. Dans ce contexte, la stabilité d'une connexion à haut débit devient un facteur déterminant.

·Besoins pour le Cloud Gaming (Full HD) : 10 à 20 Mbps

·Seuil de latence toléré : moins de 50 ms [27]

- **Télétravail et applications collaboratives**

La pratique du télétravail repose sur la convergence de multiples outils tels que la visioconférence, l'accès aux serveurs distants et le transfert de documents. Pour garantir son efficacité, une infrastructure réseau haut débit, à la fois stable et hautement sécurisée, s'avère indispensable.. [28]

- **Réalité virtuelle (VR) et réalité augmentée (AR)**

Pour garantir une immersion totale et prévenir le mal des transports lié à la latence (motion sickness), ces technologies exigent des débits extrêmement importants ainsi qu'un temps de réponse très réduit.

·Infrastructures recommandées : fibre optique, 5G ou Wi-Fi 6

·Débit nécessaire : entre 25 et 50 Mbps pour chaque flux

D’une manière générale, le bon fonctionnement des applications multimédias repose sur des infrastructures réseau performantes, offrant une connexion stable, une latence minimale et une large bande passante.

La généralisation du Wi-Fi comme principal mode d'accès aux services numériques rend ces exigences fondamentales. Il devient donc indispensable d'analyser précisément les capacités du Wi-Fi pour soutenir ce type d'usages intensifs.

Quatrième chapitre

Etude comparative

IV.1 Introduction :

Dans le cadre de ce projet de fin d'étude, la compression et la réduction des flux vidéo numériques constituent une étape importante pour garantir l'efficacité de la transmission au sein du réseau a étudié. En effet, les fichiers vidéo non compressés représentent des volumes de données extrêmement massifs, générant une occupation critique de la bande passante et une augmentation considérable des temps de transmission.

Cette étude repose sur deux phases complémentaires de la compression vidéo :

La première consiste à encoder une vidéo source brute (initialement au format non compressé ou à très haut débit comme le format AVI/RAW) vers deux standards de compression vidéo majeurs et complémentaires (H.264/AVC, H.265/HEVC). L'objectif est de comparer rigoureusement leur efficacité en termes de taux de compression et de réduction de poids, tout en préservant une qualité visuelle acceptable pour l'utilisateur.

La deuxième phase s'intéresse à mesurer le temps de transmission de ces flux vidéo compressés au sein du réseau sans fil à haut débit que nous avons élaboré, afin d'évaluer l'impact direct des différents codecs sur la vitesse de transfert. Pour ce faire, des métriques réseaux fondamentaux qui représentent les différents paramètres de qualité du réseau sont mesurées. Cette approche en deux étapes permet ainsi de mesurer à la fois les performances intrinsèques des algorithmes de compression vidéo ainsi que leur influence directe sur les comportements de transfert dans un réseau sans fil.

IV.2. Objectifs :

Dans ce chapitre, nous présentons une étude expérimentale dédiée à la compression de séquences vidéo et à leur transfert au sein d'un réseau local sans fil (Wi-Fi). Cette démarche vise à évaluer l'impact et l'efficacité des standards d'encodage vidéo lors de la diffusion et du transfert de flux multimédias.

Deux objectifs principaux sont ciblés :

- **Évaluation et classification des performances** de différents codecs et formats de compression (notamment H.264/AVC et H.265/HEVC).

- **Analyse comparative des performances de transmission** des fichiers vidéo avant et après compression, en mesurant précisément le temps de transfert, le débit utile, le volume global des données ainsi que le nombre de paquets réseau générés.

Pour ce faire, l'expérimentation a été structurée en deux phases distinctes :

1. **Phase d'encodage et de traitement** : La compression et la conversion des séquences vidéo ont été automatisées à l'aide d'un script Python s'appuyant sur l'outil FFmpeg.
2. **Phase de métrologie réseau** : Les flux vidéo ont été transmis entre deux stations du réseau (un serveur et un client) via le lecteur VLC. L'analyseur de protocoles Wireshark a été déployé en parallèle pour capturer le trafic UDP/RTP afin de quantifier les indicateurs de performance.

En matière de compression vidéo, l'enjeu fondamental demeure la réduction significative du débit binaire (*bitrate*) et de l'espace de stockage, optimisant ainsi l'occupation de la bande passante. Néanmoins, cette réduction ne doit pas altérer la qualité visuelle par l'introduction d'artefacts majeurs (tels que le flou ou la pixellisation). Ce travail s'attache donc à analyser le compromis optimal entre l'efficacité de la compression et la fidélité visuelle, garantissant une transmission rapide et stable tout en préservant l'expérience de l'utilisateur final (*Quality of Experience - QoE*).

IV.3 Outils et environnement :

Cette étude expérimentale a été réalisée dans un environnement composé de deux ordinateurs portables fonctionnant sous macOS et Windows 10, connectés à un réseau Wi-Fi servant de point d'accès.

Plusieurs outils ont été employés au cours de l'expérimentation.

- FFmpeg a servi à compresser manuellement les vidéos lors de la première méthode de compression. Chaque fichier vidéo a été traité individuellement afin

d’obtenir les différentes versions compressées.

- ❖ Python 3.x a été utilisé pour automatiser certaines opérations de traitement. Les modules de gestion des fichiers et de production des résultats ont permis d’organiser les données obtenues au cours des essais.

- ❖ VLC Media Player a été utilisé pour la diffusion et le transfert des flux vidéo entre les deux machines.

- ❖ Wireshark a permis de capturer le trafic réseau et de mesurer plusieurs paramètres de transmission, notamment le nombre de paquets échangés, le volume des données transférées et les débits observés.

- ❖ L’expérimentation s’est déroulée sous Windows 10 à l’aide de deux ordinateurs portables reliés à un réseau Wi-Fi domestique. L’un des postes était connecté au point d’accès Wi-Fi "IdoomFibre". Ce réseau fonctionnait sur la bande de fréquence de 2,4 GHz, avec le canal 1 et la norme IEEE 802.11n. La connexion reposait sur un adaptateur réseau TP-Link Wireless USB Adapter offrant un débit théorique maximal de 200 Mbit/s en émission et en réception.

IV.4 Expérimentation de la compression d’images:

Dans cette étude, une comparaison a été réalisée entre une méthode de compression manuelle et une méthode automatisée reposant sur un script Python. L’objectif était d’évaluer les performances de ces deux approches sur un ensemble de dix vidéos au format MP4. Les fichiers sélectionnés présentent des tailles différentes, ce qui permet d’analyser le comportement de chaque méthode dans plusieurs conditions de traitement.

- **Méthode 1 :** Compression manuelle à l’aide d’une suite de logicielle multimédia open source.
- **Méthode 2 :** Compression automatisée à l’aide d’un script Python.

Chaque vidéo MP4 est convertie deux formats standards afin de comparer leur efficacité Les codecs utilisés sont :

- **CODEC H264/AVC :** est une norme de compression vidéo conçue pour réduire la taille des fichiers tout en conservant une bonne qualité d'image. Elle repose sur des mécanismes de prédiction spatiale et temporelle, suivis d'une transformation et d'une quantification des données vidéo. Son efficacité explique son adoption dans de nombreux domaines, notamment le streaming vidéo, la visioconférence et la télévision numérique.

- **CODEC H265/HEVC :** est une évolution du standard H.264. Il améliore les performances de compression et réduit davantage la taille des fichiers pour un niveau de qualité similaire. Cette réduction peut atteindre environ 50 % par rapport à H.264 dans certaines conditions. Ce format est adapté aux contenus à haute résolution, notamment en Full HD, 4K et 8K.

4.1. Méthode 1 : compression manuelle

- **Application de la compression manuelle :**

La première méthode utilisée dans ce projet repose sur la compression manuelle des vidéos à l'aide de l'outil FFmpeg. Cette approche consiste à traiter chaque vidéo individuellement en exécutant une commande spécifique dans l'invite de commande Windows (CMD). FFmpeg est un logiciel libre de traitement multimédia permettant l'encodage, le décodage, la conversion et la compression des fichiers audio et vidéo. Dans cette étude, FFmpeg a été utilisé pour compresser les vidéos à l'aide des codecs H.264 (libx264) et H.265/HEVC (libx265) avec différents facteurs de qualité CRF (18, 28 et 35). Cette méthode permet de contrôler précisément les paramètres de compression et d'observer directement l'impact de chaque codec sur la taille finale des vidéos.

- **Explication de la méthode**

```
ffmpeg -i video.mp4 -c:v libx264 -crf 28 output.mp4
```

Élément	Description
ffmpeg	Lance le programme FFmpeg
-i	Indique le fichier d'entrée
video.mp4	Vidéo originale à compresser
-c:v	Définit le codec vidéo utilisé
libx264	Codec H.264
libx265	Codec H.265/HEVC
-crf	Constant Rate Factor (niveau de qualité)
18	Très haute qualité, faible compression
28	Qualité moyenne, bonne compression
35	Forte compression, qualité plus faible
output.mp4	Nom de la vidéo compressée

❖ **rôle de CRF**

Le paramètre CRF contrôle le compromis entre qualité visuelle et taille du fichier:

- CRF 18 : qualité élevée, fichier volumineux.
- CRF 28 : compromis entre qualité et compression.
- CRF 35 : forte réduction de taille mais perte de qualité plus importante.

4.2. Méthode 2 : compression automatisé

❖ **Application de la compression automatisée :**

La seconde méthode consiste à automatiser le processus de compression à l'aide d'un script Python. Contrairement à la méthode manuelle où chaque vidéo est traitée séparément, cette solution permet de compresser automatiquement plusieurs vidéos en une seule exécution. Le script parcourt .

un dossier contenant les vidéos originales, applique différents codecs et niveaux de compression, puis enregistre automatiquement les résultats dans un fichier CSV.

Cette approche présente plusieurs avantages :

- Gain de temps considérable.
- Réduction des erreurs humaines.
- Traitement simultané d'un grand nombre de vidéos.
- Génération automatique des statistiques de compression.

❖ **script Python**

```
import os

importsubprocess

import pandas as pd

import time

VIDEO_FOLDER = r"G:\video memoire\compressed"

RESULTS = []

VLC_PATH = r"C:\Program Files\VideoLAN\VLC\vlc.exe"

INTERFACE = "Wi-Fi"

DEST_IP = "192.168.1.100"

PORT = "1234"

for file in os.listdir(VIDEO_FOLDER):

if not file.lower().endswith(".mp4"):continue

video_path = os.path.join(VIDEO_FOLDER, file)
```

```
capture_file = os.path.join(

VIDEO_FOLDER,

file.replace(".mp4", ".pcapng"))

print("Traitement :", file)

tshark = subprocess.Popen(["tshark","-i", INTERFACE,"-w", capture_file])

time.sleep(3)

vlc = subprocess.Popen([

VLC_PATH,

video_path,

"--sout",

f"#rtp{{dst={DEST_IP},port={PORT},mux=ts}}","vlc://quit"])

time.sleep(30)

vlc.terminate()

tshark.terminate()

size_mb = round(

os.path.getsize(video_path) / (1024 * 1024),2)

stats = subprocess.run(["tshark","-r",capture_file,"-q","-
z","io,stat,0"],capture_output=True,text=True)

packets = 0

bytes_count = 0

try:

info = os.path.getsize(capture_file)

bytes_count = info

packets_cmd = subprocess.run(

["tshark","-r",capture_file,"-T","fields","-e","frame.number"],
```

```
capture_output=True,
text=True)
packets = len(
packets_cmd.stdout.splitlines())
except:
pass
throughput_mbps = round(
(bytes_count * 8) / (30 * 1000000),3)
RESULTS.append({"Video": file,"Video_Size_MB": size_mb,"Packets": packets,"Bytes":
bytes_count,
"Duration_s": 30,"Throughput_Mbps": throughput_mbps})
df = pd.DataFrame(RESULTS)
csv_file = os.path.join(VIDEO_FOLDER,"network_results.csv")
df.to_csv(csv_file, index=False)
print("Terminé.")
print(csv_file)
```

- **explication de script Python**
  - import os
  - importsubprocess
  - import pandas as pd
  - import time

Permet :

- parcourir les dossiers ;
- créer des répertoires ;
- manipuler les chemins des fichiers.

subprocess

Permet :

- exécuter les commandes FFmpeg depuis Python ;
- lancer automatiquement les opérations de compression.

pandas

Permet :

- créer des tableaux de données ;
- générer le fichier CSV contenant les résultats.

input_folder = r"G:\video memoire"

output_folder = r"G:\video memoire\compressed"

- le dossier contenant les vidéos originales ;
- le dossier recevant les vidéos compressées.

os.makedirs(output_folder, exist_ok=True

- Cette instruction crée automatiquement le dossier de sortie s'il n'existe pas déjà.

- qualities = {
- "High":18,
- "Medium":28,
- "Low":35
- Trois niveaux de compression sont définis

- High → CRF 18
- Medium → CRF 28
- Low → CRF 35

```
for file in os.listdir(input_folder):
```

- Cette boucle parcourt automatiquement toutes les vidéos présentes dans le dossier.

```
subprocess.run(command)
```

Cette instruction exécute la commande FFmpeg pour chaque combinaison :

- H264 + CRF18
- H264 + CRF28
- H264 + CRF35
- H265 + CRF18
- H265 + CRF28
- H265 + CRF35

```
original_size
compressed_size
```

Le script calcule :

- taille avant compression ;
- taille après compression.

```
reduction = ((original_size-compressed_size)/original_size)*100
```

- Cette formule détermine le pourcentage de réduction obtenu.

```
df.to_csv(csv_file,index=False)
```

- Cette instruction exporte automatiquement tous les résultats vers un fichier CSV exploitable dans Excel.

Cette étude compare une méthode de compression réalisée manuellement à une méthode automatisée basée sur un script Python. L'évaluation porte sur dix vidéos au format MP4 présentant des tailles différentes. Cette approche permet d'examiner les résultats obtenus par chaque méthode et de mesurer leur efficacité sur des fichiers de volumes variés.

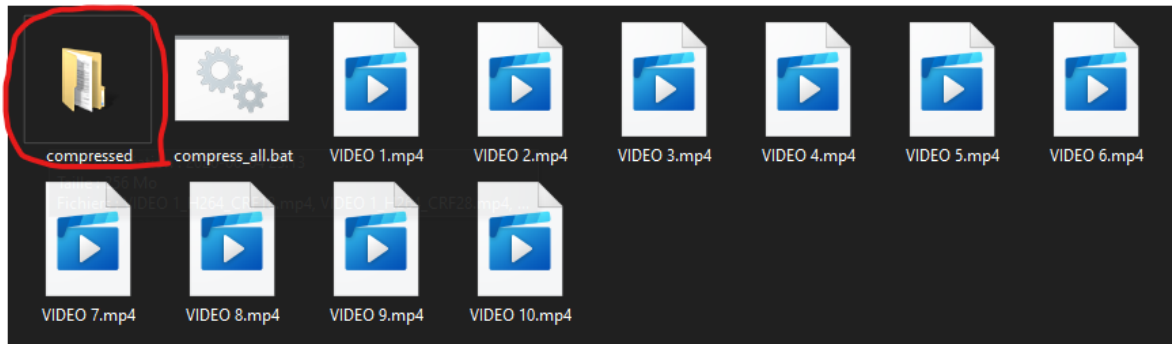


Figure 23 : Base de vidéo de sortie contenant les vidéos compressées aux différents formats

Les vidéos compressées sont enregistrées automatiquement dans le dossie

"compressed". Ce dossier est présenté dans la Figure 24 et mis en évidence par un encadrement rouge.

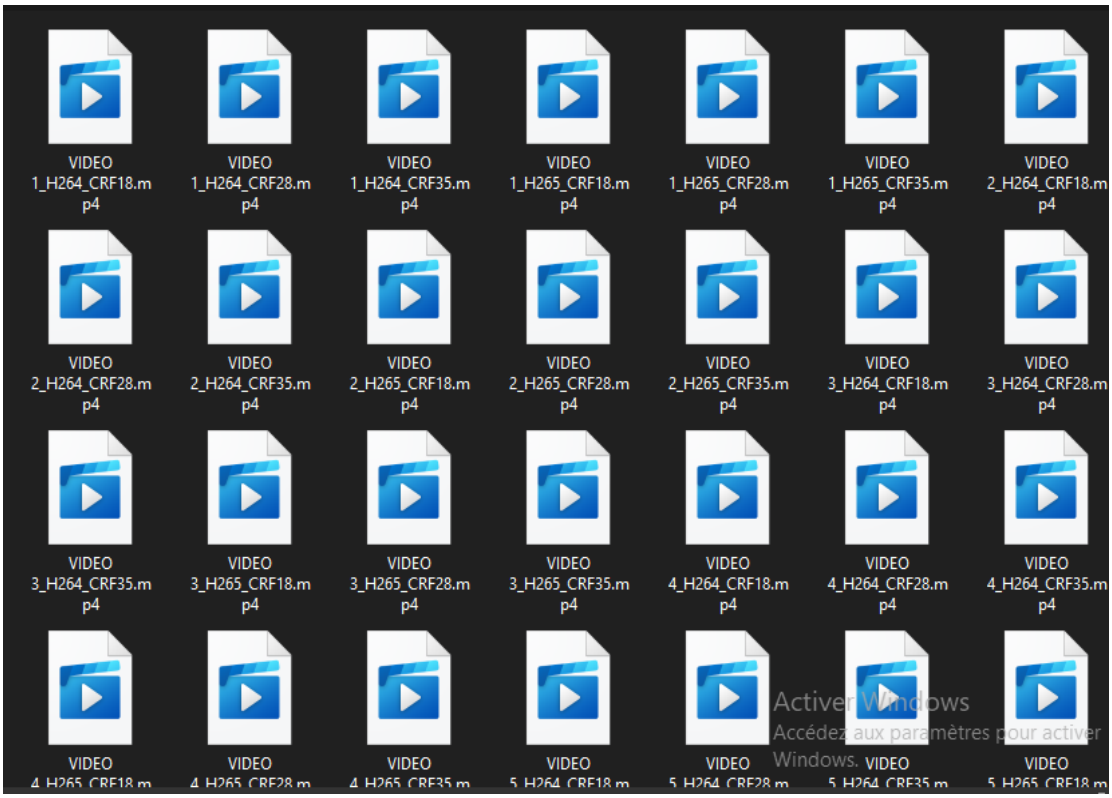


Figure 24 : Exemple de fichiers en différents formats de compression avec le rapport au CRF

4.3 Analyse et interprétation des résultats

Dans cette étude, vingt fichiers compressés ont été obtenus à partir de dix vidéos au format MP4. Chaque vidéo a été encodée avec deux codecs différents, H.264 et H.265.

Les vidéos de départ ne possédaient pas la même taille. Cette diversité permet d'évaluer le comportement des deux codecs sur des fichiers de volumes différents.

Le tableau suivant présente les résultats de compression obtenus pour les dix vidéos. Il indique la taille des fichiers générés après l'encodage avec chacun des codecs étudiés.

Vidéo	Codec	Qualité	CRF	Original MB	Compresser__MB	Reduction_Percent
VIDEO 1.mp4	H264	High	18	3.26	3.96	-21.76
VIDEO 1.mp4	H264	Medium	28	3.26	1.39	57.32
VIDEO 1.mp4	H264	Low	35	3.26	0.7	78.6
VIDEO 1.mp4	H265	High	18	3.26	4.01	-23.12
VIDEO 1.mp4	H265	Medium	28	3.26	1.14	65.02
VIDEO 1.mp4	H265	Low	35	3.26	0.48	85.38
VIDEO 10.mp4	H264	High	18	6.94	10.0	-44.04
VIDEO 10.mp4	H264	Medium	28	6.94	3.1	55.35
VIDEO 10.mp4	H264	Low	35	6.94	1.25	81.94
VIDEO 10.mp4	H265	High	18	6.94	11.0	-58.57
VIDEO 10.mp4	H265	Medium	28	6.94	2.95	57.47
VIDEO 10.mp4	H265	Low	35	6.94	1.09	84.28
VIDEO 2.mp4	H264	High	18	14.24	13.4	5.9
VIDEO 2.mp4	H264	Medium	28	14.24	3.57	74.89
VIDEO 2.mp4	H264	Low	35	14.24	1.3	90.86
VIDEO 2.mp4	H265	High	18	14.24	9.52	33.16

VIDEO 2.mp4	H265	Medium	28	14.24	2.47	82.67
VIDEO 2.mp4	H265	Low	35	14.24	0.83	94.14
VIDEO 3.mp4	H264	High	18	8.77	8.12	7.34
VIDEO 3.mp4	H264	Medium	28	8.77	2.33	73.43
VIDEO 3.mp4	H264	Low	35	8.77	0.83	90.59
VIDEO 3.mp4	H265	High	18	8.77	6.1	30.39
VIDEO 3.mp4	H265	Medium	28	8.77	1.68	80.83
VIDEO 3.mp4	H265	Low	35	8.77	0.52	94.02
VIDEO 4.mp4	H264	High	18	19.03	18.14	4.68
VIDEO 4.mp4	H264	Medium	28	19.03	5.28	72.27
VIDEO 4.mp4	H264	Low	35	19.03	1.93	89.84
VIDEO 4.mp4	H265	High	18	19.03	16.0	15.93
VIDEO 4.mp4	H265	Medium	28	19.03	4.53	76.18
VIDEO 4.mp4	H265	Low	35	19.03	1.55	91.85
VIDEO 5.mp4	H264	High	18	12.32	10.53	14.52
VIDEO 5.mp4	H264	Medium	28	12.32	2.8	77.26
VIDEO 5.mp4	H264	Low	35	12.32	1.08	91.25
VIDEO 5.mp4	H265	High	18	12.32	7.15	41.95
VIDEO 5.mp4	H265	Medium	28	12.32	1.76	85.69
VIDEO 5.mp4	H265	Low	35	12.32	0.64	94.78
VIDEO 6.mp4	H264	High	18	6.3	5.39	14.44
VIDEO 6.mp4	H264	Medium	28	6.3	1.54	75.58
VIDEO 6.mp4	H264	Low	35	6.3	0.71	88.69
VIDEO 6.mp4	H265	High	18	6.3	4.12	34.66
VIDEO 6.mp4	H265	Medium	28	6.3	1.03	83.63

VIDEO 6.mp4	H265	Low	35	6.3	0.43	93.13
VIDEO 7.mp4	H264	High	18	13.79	12.85	6.81
VIDEO 7.mp4	H264	Medium	28	13.79	3.98	71.14
VIDEO 7.mp4	H264	Low	35	13.79	1.67	87.87
VIDEO 7.mp4	H265	High	18	13.79	12.4	10.07
VIDEO 7.mp4	H265	Medium	28	13.79	3.69	73.22
VIDEO 7.mp4	H265	Low	35	13.79	1.45	89.51
VIDEO 8.mp4	H264	High	18	13.08	12.08	7.67
VIDEO 8.mp4	H264	Medium	28	13.08	3.19	75.59
VIDEO 8.mp4	H264	Low	35	13.08	1.27	90.27
VIDEO 8.mp4	H265	High	18	13.08	13.43	-2.64
VIDEO 8.mp4	H265	Medium	28	13.08	3.57	72.72
VIDEO 8.mp4	H265	Low	35	13.08	1.22	90.69
VIDEO 9.mp4	H264	High	18	4.3	4.05	5.85
VIDEO 9.mp4	H264	Medium	28	4.3	0.83	80.61
VIDEO 9.mp4	H264	Low	35	4.3	0.3	93.05
VIDEO 9.mp4	H265	High	18	4.3	3.24	24.66
VIDEO 9.mp4	H265	Medium	28	4.3	0.54	87.43
VIDEO 9.mp4	H265	Low	35	4.3	0.15	96.51

Tableau 11 : les résultats de la compression des 10 vidéos

4.4 Analyse des résultats de compression

Les résultats obtenus montrent que les deux méthodes produisent exactement les mêmes tailles de fichiers compressés. Ces résultats s'expliquent par le fait que les deux

approches utilisent le même moteur de compression, à savoir FFmpeg. Le script Python ne modifie pas les paramètres d'encodage mais automatise simplement leur exécution.

L'analyse montre également que le codec H.265 offre globalement de meilleures performances que H.264. Pour un même niveau de qualité visuelle, les fichiers générés par H.265 sont généralement plus petits.

Les taux de réduction observés dépassent souvent 80 % pour CRF 28 et peuvent atteindre plus de 90 % pour CRF 35.

Les résultats confirment donc l'efficacité du codec H.265 pour les applications nécessitant une réduction importante du volume de données à transmettre ou à stocker.

IV .5 Étude de la transmission des vidéos compressées sur un réseau Wi-Fi

Les résultats obtenus lors de l'étude comparative des codecs de compression vidéo H.264 et H.265/HEVC mettent en évidence l'importance du choix du codec dans un contexte de transmission multimédia sur un réseau Wi-Fi haut débit. Ce choix influence directement sur plusieurs paramètres essentiels, notamment le débit de transmission, le temps de transfert et la quantité de données échangées sur le réseau.

À partir des observations réalisées durant la première phase expérimentale, le codec H.265/HEVC s'est révélé particulièrement performant grâce à sa capacité à réduire significativement la taille des fichiers tout en conservant une qualité vidéo satisfaisante. Les codecs H.264 et H.265 ont donc été retenus pour la suite de l'analyse afin d'évaluer leur impact sur les performances réseau lors du streaming vidéo à l'aide de VLC Media Player et de l'analyse du trafic avec Wireshark.

5.1 Environnement expérimental

Afin d'évaluer l'impact de la compression vidéo sur les performances du réseau, une plateforme expérimentale a été mise en place. L'expérimentation a été réalisée à l'aide de deux ordinateurs physiques connectés au même réseau Wi-Fi local. Ce choix permet de reproduire un scénario réaliste de transmission multimédia, similaire aux applications de streaming vidéo utilisées dans les réseaux domestiques ou professionnels.

Pour mener cette étude, plusieurs vidéos ont été utilisées dans leur version originale ainsi que dans leurs versions compressées à l'aide des codecs H.264 et H.265/HEVC. La transmission des flux vidéo a été assurée par VLC Media Player, tandis que l'analyse du trafic réseau a été réalisée à l'aide de Wireshark. Cette approche permet d'évaluer l'influence de la compression sur différents paramètres réseau tels que le débit de transmission, le nombre de paquets échangés, le volume de données transférées ainsi que le temps de transmission.

Afin d'obtenir des résultats représentatifs, neuf scénarios de test ont été étudiés. Chaque vidéo sélectionnée (Vidéo 2, Vidéo 5 et Vidéo 10) a été transmise dans sa version originale, puis dans ses versions compressées avec les codecs H.264 et H.265. Les résultats obtenus ont ensuite été comparés afin d'analyser l'efficacité de chaque méthode de compression et son impact sur les performances du réseau lors du streaming vidéo.

Neuf scénarios ont été étudiés :

- Vidéo 2 originale
- Vidéo 2 H.264
- Vidéo 2 H.265
- Vidéo 5 originale
- Vidéo 5 H.264
- Vidéo 5 H.265
- Vidéo 10 originale
- Vidéo 10 H.264
- Vidéo 10 H.265

5.2 Configuration réseaux

Le réseau mis en place est un réseau local sans fil de type Wi-Fi. Il assure l’échange des données entre les deux ordinateurs impliqués dans l’expérimentation. Chaque machine remplit une fonction spécifique au cours du processus de transfert des fichiers.

- **PC1 (machine source)** : envoie les fichiers (vidéo)
- **PC2 (machine cible)** : reçoit les fichiers

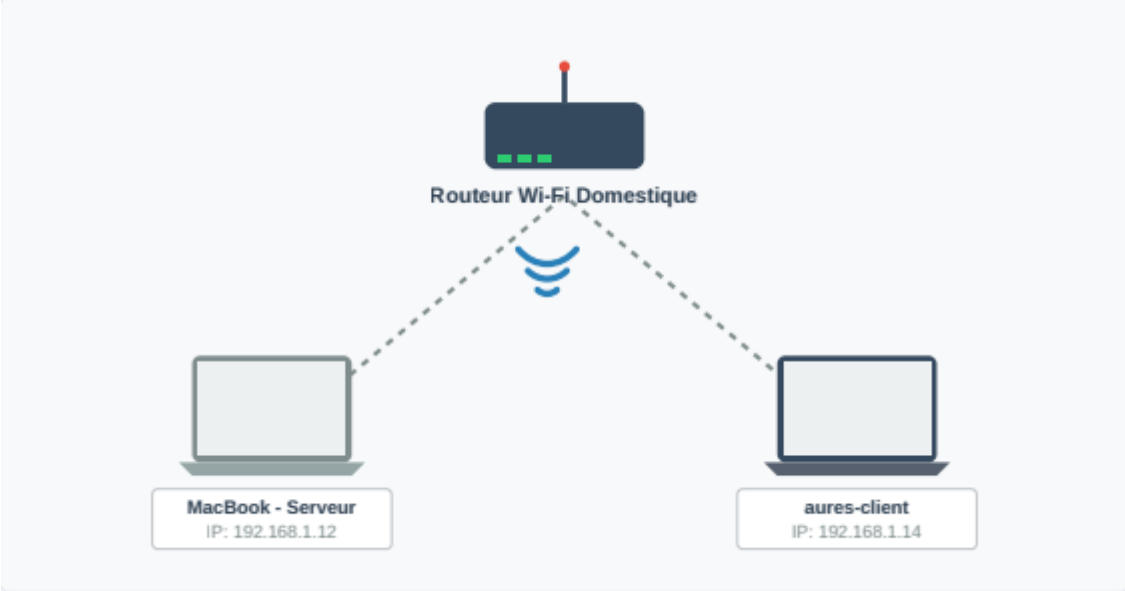


Figure 25 : architecture du réseau utilisé

Les principaux paramètres de la configuration mise en place sont les suivants.

- **Connexion** : Réseau Wi-Fi domestique
- **Adresse IP de PC1 (expéditeur)** : 192.168.1.12
- **Adresse IP de PC2 (récepteur)** : 192.168.1.14
- **Protocole utilisé** : SFTP (via SSH)

- **Logiciel de transfert** : VLC média player

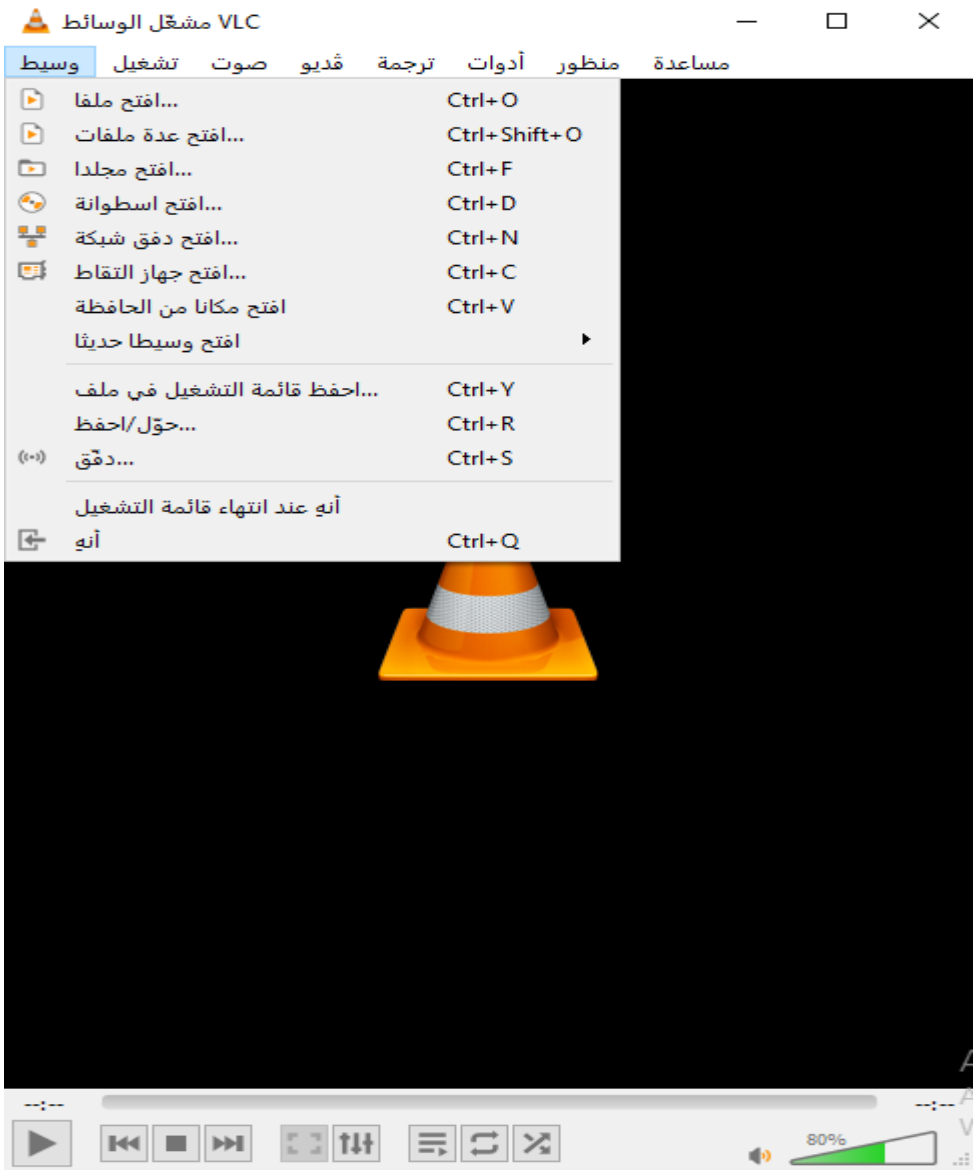


Figure 26 : VLC – logiciel utilisé pour le transfert des vidéos

- **Outil d'analyse réseau** : Wireshark (installé sur PC1 pour capturer le trafic entrant)

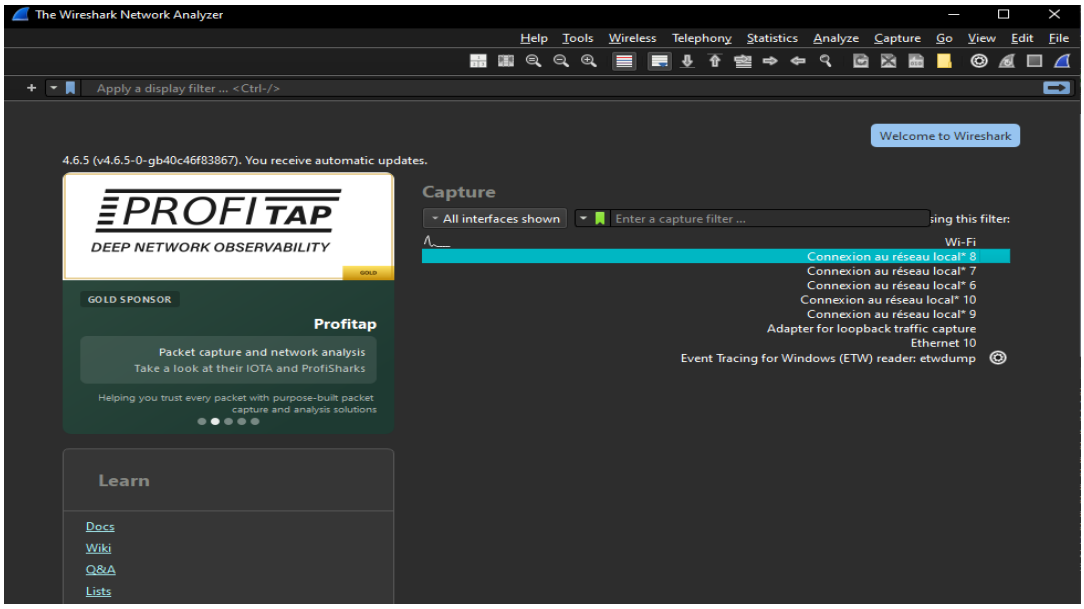


Figure 27: Wireshark – l'outil d'analyse réseau

5.3 Résultats de la diffusion

Vidéo	Format	Débit (Mbps)	Volume transféré	Paquets transmis	Durée transfert	Pertes UDP	gigue moyen
Vidéo 2	Original	3.384	8 Mo	5 879	18.87 s	≈ 0 %	2.19 ms
Vidéo 2	H.264	2.550	5 Mo	3 748	15.97 s	≈ 0 %	2.74 ms
Vidéo 2	H.265	2.634	6 Mo	4 346	17.92 s	≈ 0 %	4.64 ms
Vidéo 5	Original	2.342	6 Mo	4 345	20.15 s	≈ 0 %	7.70 ms
Vidéo 5	H.264	2.053	6 Mo	4 780	18.12 s	≈ 0 %	7.96 ms
Vidéo 5	H.265	1.950	4 Mo	2 930	16.32 s	≈ 0 %	11.50 ms
Vidéo 10	Original	4.837	6 Mo	4 535	10.18 s	≈ 0 %	4.75 ms
Vidéo 10	H.264	3.653	4 Mo	3 252	9.67 s	≈ 0 %	8.08 ms
Vidéo 10	H.265	4.530	4 Mo	2 757	6.61 s	≈ 0 %	3.41 ms

Tableau 12 : les résultats de streaming de 9 scenarios

5.4 Analyse des résultats de streaming

Les résultats obtenus montrent que la compression vidéo influence directement la charge du réseau. Les vidéos originales génèrent généralement un volume de trafic plus important en raison de leur taille élevée. Après compression, le nombre d'octets transmis diminue significativement, ce qui réduit les besoins en bande passante.

Les scénarios utilisant H.265 présentent les meilleurs résultats puisque ce codec produit les fichiers les plus compacts. La quantité de données envoyées sur le réseau est donc inférieure à celle observée avec H.264 ou avec les vidéos originales.

1. Impact de la compression sur le volume de données transférées

La compression permet de réduire significativement le volume de données échangées sur le réseau. Par exemple, pour la Vidéo 2, le volume transféré passe de 8 Mo dans la version originale à 5 Mo avec H.264 et à 6 Mo avec H.265. Pour les Vidéos 5 et 10, le volume est réduit jusqu'à 4 Mo avec le codec H.265. Cette réduction du volume transmis contribue directement à diminuer la charge du réseau et à optimiser l'utilisation de la bande passante disponible.

2. Réduction du nombre de paquets transmis

La compression entraîne également une diminution du nombre de paquets échangés. Pour la Vidéo 10, le nombre de paquets passe de 4535 pour la vidéo originale à 3252 avec H.264 et à seulement 2757 avec H.265. Cette diminution réduit la charge de traitement des équipements réseau et améliore l'efficacité globale de la transmission.

3. Influence sur la durée de transmission

Les vidéos compressées présentent généralement une durée de transmission inférieure à celle des vidéos originales. La Vidéo 10 illustre clairement cette amélioration : la durée passe de 10,18 secondes pour la version originale à 9,67

secondes avec H.264 et à seulement 8,61 secondes avec H.265. De même, pour la Vidéo 5, la durée diminue de 20,15 secondes à 16,32 secondes avec H.265. Ces résultats montrent que la compression facilite le transfert des données en réduisant le temps nécessaire à leur transmission.

4. Analyse du débit réseau

Le débit observé varie selon les vidéos et les codecs utilisés. Globalement, les versions compressées nécessitent un débit inférieur ou comparable à celui des vidéos originales tout en transmettant moins de données. Cette caractéristique est particulièrement intéressante pour les applications multimédias où la bande passante disponible est limitée.

6. Pertes de paquets

Aucune perte de paquets UDP n'a été observée durant les expérimentations (≈ 0 % pour tous les scénarios). Ce résultat confirme la stabilité du réseau Wi-Fi utilisé et garantit l'intégrité des flux vidéo transmis.

7. Analyse de la gigue (Jitter)

Les valeurs de gigue restent faibles dans tous les cas, comprises entre 2,19 ms et 11,50 ms. Ces valeurs sont largement acceptables pour les applications de streaming vidéo. Bien que certaines vidéos compressées présentent une légère augmentation de la gigue, celle-ci demeure suffisamment faible pour ne pas affecter la qualité de lecture du flux.

IVConclusion

Les résultats obtenus démontrent que la compression vidéo améliore significativement l'efficacité de la transmission sur le réseau. Les codecs H.264 et H.265 réduisent le volume de données transférées, le nombre de paquets échangés ainsi que la durée de transmission. Parmi les deux codecs, **H.265 apparaît comme la solution la plus performante**, puisqu'il offre généralement les plus faibles volumes de données et le plus faible nombre de paquets transmis tout en maintenant une bonne qualité de service. Les pertes de paquets étant nulles et la gigue restant faible,

les expérimentations confirment l'intérêt de la compression vidéo pour optimiser les performances des applications multimédias sur les réseaux Wi-Fi.

Conclusion Générale

Au terme de ce travail, une étude complète de la compression vidéo impact sur les performances des réseaux haut débit a été réalisée. Cette étude a permis de mettre en évidence l'importance des techniques de compression dans l'optimisation du stockage et de la transmission des contenus multimédias.

Dans un premier temps, les principes fondamentaux de la compression des données ainsi que les différentes méthodes de compression avec et sans perte ont été présentés. Une attention particulière a été portée aux standards de compression vidéo, notamment H.261, H.263, H.264/AVC et H.265/HEVC, qui constituent aujourd'hui les principales solutions utilisées dans les applications multimédias modernes.

La partie pratique a permis de comparer deux approches de compression vidéo : une méthode manuelle utilisant FFmpeg et une méthode automatisée développée en Python. Les résultats obtenus ont montré que les deux méthodes produisent les mêmes performances de compression puisque le script Python utilise FFmpeg comme moteur d'encodage. L'automatisation a cependant permis de simplifier le traitement d'un grand nombre de vidéos et de générer automatiquement les résultats sous forme de fichiers CSV.

L'analyse comparative des codecs H.264 et H.265 a démontré que le codec H.265 offre généralement un meilleur taux de compression tout en conservant une qualité visuelle satisfaisante. Les vidéos compressées avec H.265 présentent des tailles plus faibles que celles obtenues avec H.264, ce qui permet de réduire davantage les besoins en stockage et en bande passante.

Les expérimentations de streaming réalisées à l'aide de VLC Media Player et analysées avec Wireshark ont également montré que la compression vidéo améliore l'efficacité de la transmission sur le réseau. Les résultats obtenus mettent en évidence une

diminution du volume de données transférées, du nombre de paquets échangés ainsi que de la durée de transmission pour les vidéos compressées. Les mesures de gigue et de pertes de paquets sont restées faibles, ce qui confirme la stabilité du réseau utilisé durant les tests.

En conclusion, cette étude confirme que la compression vidéo constitue une solution efficace pour optimiser l'utilisation des ressources réseau tout en maintenant une qualité de service satisfaisante. Parmi les codecs étudiés, H.265/HEVC apparaît comme la solution la plus performante en termes de réduction de taille et d'efficacité de transmission. Ces résultats soulignent l'intérêt de l'utilisation des techniques de compression avancées dans les applications de streaming vidéo et de communication multimédia sur les réseaux haut débit.

Références

[1] Selmi Mohammed El-Amin et Yala Mohammed « Synthèse et étude comparative sur les méthodes de compression vidéo. » Université AboubakrBelkaïd– Tlemcen – Faculté des technologie département d'informatique **02/07/2017**

[2] Messaoudikawthar, «Etude des performances de transfert d'image compressée dans un réseau haut débit » Université AboubakrBelkaïd– Tlemcen – Faculté de TECHNOLOGIE 30/06/2025

[3] OUAISSA Nassima « Méthode de compression de données sans perte basée sur les nombres premiers » UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET INFORMATIQUE 2012

[4] AbhijeetMohapatra and Michael Genesereth," IncrementallyMaintainingRun-lengthEncodedAttributes in Column Stores", StanfordUniversity

[5] Thales.G (2024, 26 septembre). 5G technology and networks (speed, use cases, rollout).

[6] B. Bross, W.-J. Han, G. J. Sullivan, J.-R. Ohm, and T. Wiegand, High EfficiencyVideoCoding (HEVC) TextSpecificationDraft 9, document JCTVC-K1003, ITU-T/ISO/IEC Joint Collaborative Team on VideoCoding (JCT-VC), Oct 2012

[7]International Telecommunication Union. (2007). Definitions of World Telecommunication/ICT Indicators, April 2007. Chapitre "Fixedbroadband Internet subscriptions"

[8] European Court of Auditors. (2018). Special Report No 12/2018: Broadband in the EU Member States. Luxembourg: Publications Office of the European Union, pp. 6–8.

[9] Gillis, A. S., Jones, D., & Beaver, K. (2023). Whatis LTE (Long-Term Evolution)?TechTarget.

[10] Bensalem, R. (2022). Étude de l'évolution des technologies Wi-Fi et de leurs performances (Mémoire de Master, Université de Tizi-Ouzou, Algérie).

[11] Harfi, A. (2020). Compression d'images fixes basée sur l'algorithme SPIHT (Mémoire de Master). Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (UMMTO).

[12] Ait-Ouamar, L. (2021). Étude comparative des technologies de transmission : avantages et limites de la fibre optique (Mémoire de Master, Université de Tizi-Ouzou, Algérie).

[13] Boukhalfa, S. (2021). Conception et architecture des réseaux filaires : principes et applications (Mémoire de Master, Université de Boumerdès, Algérie).

[14] Mehdi, A. (2022). Étude technico-économique du déploiement des réseaux filaires et en fibre optique (Mémoire de Master, Université de Constantine, Algérie).

[15] Bouderbala, F. (2021). Étude comparative des supports de transmission : cuivre vs fibreoptique (Mémoire de Master, Université de Béjaïa, Algérie).

[16] Zerari, M. (2021). Conception et déploiement des réseaux d'entreprise : étude des solutions filaires (Mémoire de Master, Université de Skikda, Algérie).

[17] Saidi, K. (2022). Étude des infrastructures réseau des centres de données : rôle de la fibreoptique (Mémoire de Master, Université de Blida, Algérie).

[18] Amrani, L. (2020). Évaluation des solutions filaires et sans fil pour l'accès à Internet dans les environnements résidentiels (Mémoire de Master, Université de Bouira, Algérie).

[19] Khiati, M. (2021). Étude des performances et des enjeux liés au déploiement de la fibre optique (Mémoire de Master, Université de Tizi-Ouzou, Algérie).

[20] Bouchareb, R. (2021). Optimisation des performances réseau pour les plateformes de visioconférence (Mémoire de Master, Université de Blida, Algérie).

[21]Kurose, J. F., & Ross, K. W. (2021). Computer Networking: A Top-Down Approach (8th ed.). Pearson Education.

[22] Dahmani, R. (2022). Analyse des caractéristiques et des défis des réseaux sans fil (Mémoire de Master, Université de Constantine, Algérie).

[23] Didier Le Gall,MPEG:Avideo compression standard for multi media application,vol 34 No 4, April 1991

[24] Joan Mitchell, William B. Pennebaker, Chad, E. Fogg and Didier J. Legall,"MPEGvideo compression standard", International thompson publishing,p470

[25] Didier LeGall,"MPEG: avideo compression standard for multimedia applications". Communications of the ACM, April 1991, Vol 34, No 4, p13

[26] Thomas Sikora. "MPEG Digital VideoCoding Standards", R.Jurgens,FirstEdition,,Berlin

[27] L. Chiariglione (Convenor),"MPEG-4 project description", Document ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 N1177, Munich MPEG meeting, January 1996.

[28] Benali, M. (2022). Impact du télétravail sur les infrastructures réseaux : étude des exigences techniques (Mémoire de Master, Université de Tlemcen, Algérie).