Numéro d'ordre : 19/13

Université Polytechnique Haut-de-France (UPHF)
Université Badji Mokhtar d'Annaba (UBMA)

École doctorale **Sciences Pour l'Ingénieur (SPI)**

Unité de recherche **Institut d'Electronique, de Micro-Electronique et de Nanotechnologie (IEMN/DOAE) et Laboratoire d'Automatique et Signaux d'Annaba (LASA)**

Thèse présentée par **Mohamed Aymen Labiod**

Soutenue le **5 juillet 2019**

En vue de l'obtention du grade de docteur de l'Université Polytechnique Haut-de-France (UPHF) et de l'Université Badji Mokhtar d'Annaba (UBMA)

Discipline **ÉLECTRONIQUE**

Spécialité **Télécommunication**

Titre de la thèse

Contribution à l'amélioration des transmissions vidéo dans les réseaux ad-hoc véhiculaires (VANET)

Thèse dirigée par	M. François-Xavier Coudoux	directeur
	M. Noureddine Doghmane	directeur
	M. Mohamed Gharbi	co-encadrant
	M. Patrick Corlay	co-encadrant

Composition du jury

Rapporteurs	M. Abdelhamid Mellouk	professeur à l'Université Paris-Est Créteil	*président du jury*
	Mme. Amina Serir	professeur à l'Université d'Alger US-THB	
Examinateurs	Mme. Anissa Mokraoui	professeur à l'Université Paris 13	
	M. Salim Bitam	professeur à l'Université de Biskra UMKB	
Directeurs de thèse	M. François-Xavier Coudoux	professeur à l'UPHF	
	M. Noureddine Doghmane	professeur à l'Université d'Annaba UBMA	
	M. Mohamed Gharbi	MCF à l'UPHF	
	M. Patrick Corlay	professeur à l'UPHF	

Mots clés : HEVC, inter-couche, faible délai, VANET, IEEE 802.11p, MAC, MDC.
Keywords: HEVC, cross-layer, low delay, VANET, IEEE 802.11p, MAC, MDC.

Cette thèse a été préparée au

Institut d'Electronique, de Micro-Electronique et de Nanotechnologie (IEMN/DOAE)
et Laboratoire d'Automatique et Signaux d'Annaba (LASA)

.

Je dédie ce travail à mes parents qui ont toujours cru en moi et m'ont soutenu

A mon père qu'il repose en paix,

A ma mère et mes sœurs.

La marque distinctive du savant, c'est la capacité d'enseigner.

Aristote

Il n'y a point de génie sans un grain de folie.

Aristote

Celui qui déplace une montagne commence par déplacer de petites pierres.

Confucius

Le monde déteste le changement, c'est pourtant la seule chose qui lui a permis de progresser.

Charles F. Kettering

Contribution à l'amélioration des transmissions vidéo dans les réseaux ad-hoc véhiculaires (VANET)

Résumé

Actuellement les communications véhiculaires sont devenues une réalité guidée par diverses applications. Notamment, la diffusion de vidéo de qualité élevée avec des contraintes de faible latence requises par les applications temps réel. Grâce au niveau de compression jamais atteint auparavant, l'encodeur H.265/HEVC est très prometteur pour la diffusion de vidéos en temps réel dans les réseaux ad hoc véhiculaire (VANET). Néanmoins, la qualité de la vidéo reçue est pénalisée par les mauvaises caractéristiques du canal de transmission (disponibilité, non stationnarité, rapport signal à bruit, etc.). Afin d'améliorer et d'assurer une qualité vidéo optimale à la réception nous proposons dans ce travail une optimisation conjointe source-canal-protocole de la transmission en tenant compte à la fois des paramètres de transmission et d'encodage vidéo.
Dans un premier temps, nous montrons l'intérêt et le gain apporté par les solutions dites inter-couches « cross-layer ». Par la suite, nous développons deux approches l'une exploitant un « cross-layer » entre la couche application et la couche MAC et une seconde exploitant les protocoles de transports dans l'adaptation du flux vidéo. En ce qui concerne la première approche nous proposons une solution utilisant une gestion hiérarchique des trames au niveau des files d'attentes de la couche MAC, basée sur l'importance des images du flux vidéo. Dans une seconde solution, nous retenons le codage par descriptions multiples comme solution de protection à la source. Les résultats de simulations obtenus pour plusieurs types de scénarios véhiculaires réalistes montrent que les différents schémas de transmission véhiculaire proposés offrent des améliorations significatives en termes de qualité vidéo à la réception et de retard de bout en bout par rapport aux schémas classiques.

Mots clés : HEVC, inter-couche, faible délai, VANET, IEEE 802.11p, MAC, MDC.

Abstract

At present, vehicular communications have become a reality guided by various applications. In particular, high-quality video delivery with low latency constraints is required for real-time applications. The new state-of-the-art high-effciency video coding (HEVC) standard is very promising for real-time video streaming in vehicular ad hoc networks (VANET). Nevertheless, these networks have variable channel quality and a limited bandwidth that penalizes the overall performances of end-to-end video transmission. In order to meet these constraints, we proposed in this work to consider both transmission and video encoding parameters through a joint source-channel-protocol coding approach to provide an improvement in video transmission.
First, we have shown the interest and the gain brought by the "cross-layer" solutions. Then, we developed two approaches. The first one exploits a "crosslayer" solution between the application layer and the Medium Access Control (MAC) layer while the second exploits the transport layer protocols in the adaptation of the video stream. Regarding the first approach, we have proposed solutions to allocate the frames to the most appropriate Access Category (AC) queue on the MAC layer based on the image importance in the video stream. In another solution, we chose multiple descriptions source coding as an error resilient solution. Thus, the simluation results obtained for different realistic vehicular scenarios demonstrate that the proposed transmission schemes offer significant video quality improvements and end-to-end delay reduction compared to conventional transmission schemes.

Keywords: HEVC, cross-layer, low delay, VANET, IEEE 802.11p, MAC, MDC.

Institut d'Electronique, de Micro-Electronique et de Nanotechnologie (IEMN/DOAE) – et Laboratoire d'Automatique et Signaux d'Annaba (LASA)

– – – – –

Remerciements

Ce travail de thèse a été réalisé conjointement au sein du laboratoire Opto-Acousto-Electronique de l'antenne valenciennoise de l'Institut d'Electronique de Microélectronique et de Nanotechnologies (IEMN), et du Laboratoire d'Automatique et Signaux d'Annaba (LASA).

C'est avec un grand plaisir que je réserve ces lignes en témoignage de ma reconnaissance à tous ceux qui m'ont accompagné, soutenu et aidé pour mener à bien les travaux présentés dans ce manuscrit de thèse.

En premier lieu, je tiens à exprimer ma grande gratitude à mes quatre encadrants pour la qualité de leur encadrement, leur suivi attentif et l'entière disponibilité qu'ils ont manifestée à mon égard tout au long de la réalisation de ce travail.

Particulièrement, j'exprime mes profonds remerciements à M. François-Xavier Coudoux pour sa disponibilité, son implication et son soutien continu mais aussi de m'avoir fait confiance dès le début. Également, à M. Noureddine Doghmane, mon mentor depuis mon cursus de licence, ce fut un immense privilège de travailler à ses côtés tout au long de ces années.

Je suis aussi très reconnaissant à M. Mohamed Gharbi pour avoir mis son expérience et ses riches connaissances à ma disposition et également pour sa motivation, sa disponibilité et ses conseils. Ainsi qu'à M. Patrick Corlay pour ses critiques précises et appréciées. Je les remercie tous pour tout le temps qu'ils m'ont consacré ainsi que pour tous les précieux conseils et pertinentes remarques qu'ils ont formulées au cours de ces trois années. Je mets de côté l'aspect le plus important à mes yeux, l'aspect humain de chacune de ces personnes puisque comme le dit Molière (je me permets de la transposer) : "plus on "apprécie" quelqu'un, moins il faut qu'on le flatte" xD.

Mes remerciements vont également à Mesdames Amina Serir et Anissa Moukraoui ainsi que Messieurs Abdelhamid Mellouk et Salim Bitam d'avoir accepté de juger la qualité de mon travail de thèse et je leur exprime ma sincère reconnaissance.

J'aimerais également remercier Mme. Atika Rivenq et Messieurs Yassin El-Hillali et Mahmoud Taibi, je n'oublie pas que c'est grâce à mon stage de master que j'ai initialement intégré le groupe COMNUM. Je ne peux pas oublier de remercier l'ensemble de mes collègues de l'IEMN/DOAE pour leur sympathie et leur bonne humeur, j'ai beaucoup apprécié la camaraderie de tous les membres du laboratoire.

A titre plus personnel, je voudrais aussi remercier l'ensemble de mes amis pour tous les bons moments passés ensemble, à Valenciennes ou ailleurs.

Enfin, je tiens fortement à exprimer mes profonds remerciements à mes parents et à mes sœurs pour leur amour, leur patience sans failles, leur soutien et la confiance qu'ils me permettent d'acquérir, dans le cadre de ma thèse mais aussi dans mon parcours de vie.

Une pensée spéciale pour mon père, mon premier encadrant, que je remercie pour tous les encouragements et les enseignements qu'il m'a transmis et qui ont représenté une énergie essentielle pour mener à bien ce travail et aller de l'avant.

Sommaire

Résumé xiii

Remerciements xv

Sommaire xvii

Liste des tableaux xix

Table des figures xxi

Introduction 1

I Transmission vidéo dans les réseaux ad-hoc véhiculaire (VANET) 3

1 Contexte de l'étude 5

2 Evaluation de la transmission vidéo dans les réseaux VANETs 27

II Amélioration de la transmission vidéo avec un système cross-layer basé sur la couche MAC 41

3 Solutions inter-couche pour le streaming à faible latence sur les réseaux VANET 43

4 Solution inter-couche pour le streaming à faible latence basée sur un encodage à descriptions multiples 73

III Amélioration de la transmission vidéo avec un système cross-layer basé sur la couche transport 83

5 Amélioration de la transmission vidéo avec un système cross-layer basé sur la couche transport 85

Conclusion et perspectives 93

Production scientifique 97

Bibliographie 99

Table des matières **107**

Liste des tableaux

3.1 Catégories d'accès du standard IEEE 802.11p 49
3.2 Nombre de paquets reçus pour les différents algorithmes. 59
3.3 Nombre et type de perte de paquets dans l'environnement 1 60
3.4 Evaluation du PSNR moyen pour chaque méthode d'acheminement et différents scénarios. 60
3.5 Tableau des PSNR moyens. 65
3.6 PSNR moyen et nombre de paquets perdus pour chaque algorithme d'acheminement 67
3.7 PSNR moyen et nombre de paquets perdus pour chaque simulation. 70

4.1 Écart type MSE, PSNR moyen et SSIM moyen pour chaque algorithme d'acheminement 81
4.2 Écart type de l'EQM, PSNR moyen, SSIM moyen et nombre de paquets perdus pour chaque algorithme d'acheminement 82

5.1 Le PSNR pour une transmission vidéo avec différents protocoles transports. . . . 90
5.2 Le Jitter moyen pour une transmission vidéo avec différents protocoles transports 90
5.3 Le Jitter maximal pour une transmission vidéo avec différents protocoles transports 90

Table des figures

1.1 Exemple de communication véhiculaire. 7
1.2 Véhicules autonomes 7
1.3 Exemple de streaming vidéo V2X. 9
1.4 La pile de protocoles WAVE/DSRC. 12
1.5 L'espacement des canaux WAVE. 12
1.6 DSRC vs C-V2X. 14
1.7 Composition d'un groupe d'images (Group Of Picture GOP). 16
1.8 Gain du HEVC en débit binaire. 18
1.9 Encodeur vidéo typique HEVC (avec des éléments de modélisation de décodeur en gris clair). 18
1.10 Comparaison entre le découpage du H.264/AVC et du H.265. 19
1.11 Deux modèles d'architecture en couche l'OSI et le TCP/IP 21
1.12 Les différentes conceptions inter-couche 22

2.1 Représentation de notre modélisation VANET 28
2.2 Rapport débit distorsion pour la transmission de différentes séquences de test encodées en HEVC : a) Parkscene sequence ; b) Racehorses ; c) Blowingbubbles, et d) KristenAndSara. 35
2.3 Rapport débit distorsion pour la transmission de différentes séquences de test encodées en H.264 : a) Parkscene sequence ; b) Racehorses ; c) Blowingbubbles, et d) KristenAndSara. 36
2.4 Le pourcentage de paquets correctement livrés pour la séquence de Racehorses encodée avec H.265 36
2.5 Représentation des SI et TI des séquences de test utilisées. 38
2.6 Rapport débit distorsion pour les différentes séquences de classe C. 38

3.1 Architecture MAC définie dans IEEE 802.11e 45
3.2 Quatre catégories d'accès dans le standard IEEE 802.11p. 47
3.3 Exemple de concurrence pour l'accès au support dans EDCA IEEE 802.11p. . . . 49
3.4 Présentation graphique de la configuration de l'accès aléatoire. 54
3.5 Présentation graphique de la configuration Low Delay B. 54
3.6 Présentation graphique de la configuration modifiée de la structure Low Delay B. 56
3.7 Présentation graphique de la configuration modifiée de la structure Low Delay P. 56
3.8 Illustration de l'algorithme inter-couche adaptatif. 57
3.9 Organigramme de l'algorithme inter-couche adaptatif. 58
3.10 Représentation graphique de la hiérarchisation de la configuration Low Delay B modifié 61
3.11 Présentation graphique de la classification adoptée pour configuration RA . . . 62

3.12 Illustration de l'algorithme inter-couche statique. 62
3.13 Illustration de l'algorithme inter-couche adaptatif. 63
3.14 Représentation des SI et TI des séquences de test utilisées. 64
3.15 L'évolution temporelle du PSNR pour les différents schémas d'encodage. 66
3.16 Variation du PSNR pour les différents algorithmes d'acheminement : EDCA (vert), statique (bleu) et adaptatif (rouge) ; la partie zoomée montre une partie agrandie des courbes pour une durée de 2 secondes. 66
3.17 Algorithme d'acheminement EDCA : état de remplissage de la file d'attente, qualité vidéo PSNR et indication des paquets d'images perdues au fil du temps. 68
3.18 Algorithme d'acheminement statique : état de remplissage de la file d'attente, qualité vidéo PSNR et indication des images perdues au fil du temps. 68
3.19 Algorithme d'acheminement adaptatif : état de remplissage de la file d'attente, qualité vidéo PSNR et indication des paquets d'images au fil du temps. 69

4.1 Modèle MDC basique avec deux encodeurs. 74
4.2 Représentation du schéma de transmission MDC adopté. 76
4.3 Le mécanisme de dissimulation d'erreur adopté. 77
4.4 Illustration de l'algorithme inter-couche statique. 77
4.5 Illustration de l'algorithme inter-couche adaptatif. 78
4.6 Algorithme EDCA : état de remplissage de la file d'attente et le PSNR de la vidéo décodée. 79
4.7 Algorithme d'acheminement statique : état de remplissage de la file d'attente et le PSNR de la vidéo décodée. 79
4.8 Algorithme d'acheminement adaptatif : état de remplissage de la file d'attente et le PSNR de la vidéo décodée. 80
4.9 Variation du PSNR pour les différents algorithmes d'acheminement. 81

5.1 Illustration du mécanisme d'adaptation vidéo dans les VANET proposé 91
5.2 Variation du PSNR pour une transmission vidéo adaptative. 92

Introduction

Au cours des dernières années, les systèmes de transport intelligents et les communications véhiculaires ont suscité l'intérêt du milieu de la recherche et de l'industrie. Le développement des réseaux ad hoc véhiculaires (VANET) a ouvert la possibilité de déployer des applications destinées à la sécurité et à la gestion du trafic, ainsi qu'au confort et au divertissement. La transmission de contenus vidéo sur les réseaux de véhicules représenterait un progrès supplémentaire. En effet, le streaming vidéo sur les VANET est nécessaire pour de nombreuses applications telles que les manœuvres de dépassement, l'assistance au passage des piétons, l'assistance aux transports publics, la vidéosurveillance ou la communication vidéo pour le divertissement. Cependant, la vidéo compressée est très sensible au bruits, à la gigue et aux pertes des données. Les systèmes de transmission doivent donc offrir à la fois haut débit, faible latence et bonne qualité de transmission afin de répondre à l'exigence des applications visées. Alors que les réseaux VANET offrent des conditions de transmission difficiles et un taux de perte de paquets (PLR) associé qui ne fournit aucune garantie de qualité de service (QoS).

Par conséquent, certaines solutions technologiques ont été récemment proposées pour améliorer les transmissions multimédias sur les réseaux de véhicules. Notamment, le WI-FI avec son extension IEEE 802.11p pour les réseaux de véhicules qui s'adapte aux variations (QoS) en fournissant des classes de service différenciées au niveau de la couche de contrôle d'accès au médium (MAC). D'autre part, le codec vidéo H.265 / High Efficiency Video Coding (HEVC) apporte un gain de compression non négligeable, fort utile étant donné les contraintes de bande passante dont souffrent les VANETs.

Dans le contexte de la transmission vidéo dans les VANETs, l'objectif de ce travail de thèse est donc d'apporter quelques éléments de réponse à ce problème d'amélioration de la qualité de service des transmissions vidéo sans fil en proposant des schémas de codage conjoint source-canal.

Dans cette optique, plusieurs solutions ont été proposées dans la littérature à différents niveaux de la chaine de transmission. Notamment des solutions inter-couches « cross-layer » qui offrent des gains de qualité conséquents. Dans ce travail de thèse, des schémas inter-couches sont proposés pour améliorer la diffusion vidéo HEVC dans les VANET. Ainsi, nous proposons des améliorations dans l'acheminement des trames au niveau de la couche MAC, de la norme dédiée au véhiculaire IEEE 802.11p, avec des solutions basées sur l'adaptation de l'encodage de la vidéo et des solutions de protection du flux vidéo au niveau de la source. Nous proposons également d'exploiter le protocole de transport dans un système de streaming adaptatif. Les mécanismes inter-couches proposés ont été évalués par simulation dans des environnements véhiculaires réalistes.

Le manuscrit est divisé en cinq chapitres répartis en trois parties. Le premier chapitre donne un aperçu du contexte applicatif de la thèse. Il décrit les différentes approches et techniques sur lesquelles les solutions choisies vont s'appuyer ainsi qu'un état de l'art des solutions existantes dans la littérature. Le second chapitre présente un état de l'art des outils de simulation ainsi

que la modélisation de canal véhiculaire. Nous avons également présenté une évaluation des performance d'une transmission vidéo dans un scénario VANET ; ces deux premiers chapitres constituent la première partie du manuscrit.

Le troisième et le quatrième chapitre constituent la deuxième partie du manuscrit, dans les deux chapitres les solutions basées sur l'amélioration de l'acheminement des trames au niveau de la couche MAC pour un streaming à faible latence sont présentées. Dans le troisième chapitre, les algorithmes tirent parti des nouvelles structures de prédiction temporelles introduites dans le HEVC. Les mécanismes proposés prennent en compte à la fois l'importance de la trame dans une vidéo et la connaissance du canal qui est disponible à l'émetteur. Dans le quatrième chapitre, nous avons retenu le codage par descriptions multiples comme solution de protection à la source du flux vidéo. La solution proposée est comparée à un schéma d'encodage vidéo classique SDC (Single Description Coding).

Dans la dernière partie du manuscrit constituée du cinquième chapitre, nous apportons une solution d'adaptation vidéo basée sur le protocole de transport. Préalablement une comparaison entre les différents protocoles de transport pour une transmission vidéo dans les VANETs est abordée. Enfin, la conclusion générale synthétise les principaux résultats de cette étude et propose des perspectives à ce travail.

Première partie

Transmission vidéo dans les réseaux ad-hoc véhiculaire (VANET)

Chapitre 1

Contexte de l'étude

1.1 Introduction

Dans un avenir proche les réseaux véhiculaires seront aussi communs que le sont les smartphones aujourd'hui. En effet, les véhicules seront équipés de différents types de capteurs, un certain degré de capacité de calcul et la possibilité de communiquer avec les autres véhicules et avec les infrastructures disponibles le cas échéant. Ils seront en mesure de recueillir des informations, les élaborer et les distribuer. Ceci, rendra possible l'émergence du système de transport intelligent (ITS).

L'un des axes de développement majeurs des ITS est les réseaux ad-hoc de véhicules (VANET) qui constituent aujourd'hui un des domaines d'application les plus prometteurs des réseaux sans fil dits ad-hoc, capables de s'organiser sans l'aide d'une infrastructure prédéfinie. Ces réseaux véhiculaires permettent aux véhicules de communiquer entre eux ou avec les infrastructures à proximité du réseau routier et conduiront à terme à des routes plus sûres et mieux utilisées via l'échange d'informations opportunes aux conducteurs et aux autorités (police, SAMU, ...). En particulier, la transmission de données vidéo dans les VANETs représente un enjeu majeur car l'information vidéo va enrichir considérablement la qualité d'expérience perçue par l'usager et/ou la connaissance de l'environnement .

Toutefois, la transmission de données vidéo dans les VANETs constitue une tâche difficile : les réseaux véhiculaires sont un environnement hostile pour la transmission des données (nombreuses pertes de paquets, mobilité des noeuds, ...), tandis que la transmission vidéo est une application exigeante en termes de qualité de service car très sensible aux perturbations sur le canal de transmission, notamment du fait de la compression appliquée aux données vidéo pour réduire la bande passante occupée.

Dans ce premier chapitre nous allons d'abord rappeler le contexte de l'étude avec le développement des normes et des systèmes de transport intelligent. Nous allons également rappeler les exigences et les applications des transmissions vidéo sur les réseaux ad-hoc véhiculaires. D'autre part, les domaines des télécommunications, du multimédia et de la transmission vidéo ont connu une évolution fulgurante. Leurs performances s'améliorent chaque jour pour répondre aux exigences de plus en plus élevées en termes de qualité et temps de traitement. Ainsi, nous allons faire un focus sur l'encodage et la transmission d'un flux vidéo avec les dernières normes d'encodage vidéo.

1.2 Contexte de l'étude

1.2.1 Développement des systèmes de transport intelligents

Le développement économique a été fortement associé à l'urbanisation, submergeant les villes de véhicules, d'autant plus que les transports en général et les infrastructures en particulier sont des segments importants de l'économie. Ainsi le nombre de véhicules en circulation dans le monde en 2017 dépasse le milliard de véhicules et devrait atteindre 3 milliards d'ici 2050 selon un rapport des Nations Unies. De plus, d'ici à 2050, environ 68% (55% en 2018) de la population mondiale vivra dans des zones urbaines représentant la contribution croissante des villes à l'économie mondiale et aux émissions de carbone [91]. Selon l'agence internationale de l'énergie (AIE), les villes sont responsables à hauteur de 70% de la demande mondiale d'énergie mais également des émissions de gaz à effet de serre [21]. Cela entraîne une série de résultats négatifs, tels que :

1. La dégradation des ressources environnementales/naturelles qui s'explique par la consommation d'énergie accrue et la quantité importante d'émissions de CO2.
2. Des effets socio-économiques avec : l'énorme perte de temps dans les embouteillages, selon la société d'info trafic américaine INRIX les automobilistes français ont passé en 2017 une moyenne de 22 heures dans les bouchons [19]. En plus des accidents et la dégradation de la qualité de vie avec l'augmentation du nombre de décès.
3. Des conséquences techniques pour un compromis de sécurité.

Ces faits révèlent des inefficiences liées aux transports urbains, identifiées par les chercheurs des organismes publics et du secteur privé.

Les récents progrès et développement dans le transport routier ont permis à des solutions de mobilité coopérative et de conduite automatisée innovantes et rentables de voir le jour. Ceci contribue à améliorer l'efficacité énergétique, la sécurité individuelle et l'efficacité du transport. Ces initiatives constituent une des pierres angulaires des systèmes de transport intelligents (STI). En permettant aux véhicules de communiquer entre eux par le biais d'une communication véhicule à véhicule (V2V) ainsi qu'avec les stations de base routières via une communication véhicule à infrastructure (V2I), les STI peuvent contribuer à des routes plus sûres et plus efficaces [60]. La Figure1.1 illustre un exemple de communication véhiculaire.

D'un point de vue complémentaire, les systèmes de gestion avancés pour les véhicules et les piétons constituent une exigence de service essentielle dans le domaine des transports, et ce, dans de nombreux pays. Malgré la mise en place encore actuelle de systèmes de gestion et de sécurité du trafic, il reste encore beaucoup à faire pour optimiser l'efficacité et la sécurité des transports [3]. Certaines des causes pouvant être identifiées sont :

— Les changements de conditions du trafic peuvent être soudains et récurrents, ou tout simplement dus à des situations exceptionnelles. Le trafic doit donc être évalué en temps réel et communiqué aux conducteurs de manière à pouvoir être pris en compte.
— Les changements soudains dans le trafic sont souvent la cause directe d'accidents. Là encore, l'infrastructure de transport devrait communiquer ces changements en temps réel afin de réduire les risques d'accidents et donc les pertes de vies.
— Les systèmes d'évaluation et de gestion du trafic sont centralisés. Cela signifie qu'ils ne sont pas adaptés pour un traitement rapide des changements de trafic. Ces systèmes ne soutiennent pas non plus la coopération des services concernés.
— Les capacités de communication avec les entités externes véhicule à tout (V2X) sont encore insuffisantes dans les véhicules.

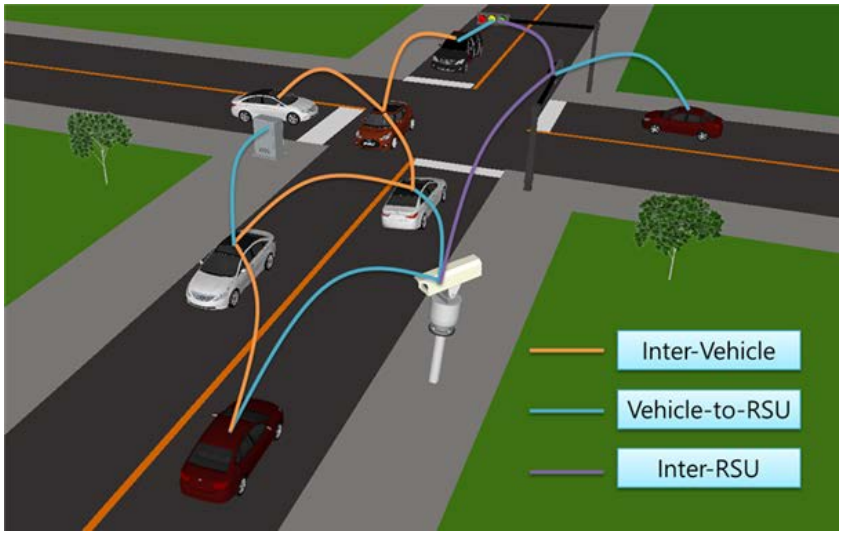


Figure 1.1 – Exemple de communication véhiculaire.

— Il n'y a pas de communication directe (ou encore insuffisante) entre l'infrastructure et les voitures pour une indication de l'état du trafic. Les conducteurs ne sont pas au courant des conditions de trafic en temps réel et n'ont donc aucun moyen de se comporter ou de s'adapter en conséquence.
— Le niveau de gestion des feux de croisement est minimal et résulte simplement d'une supposition ou de règles telles que "si le feu passe au rouge, la voiture s'arrête et donc 3 secondes après, le piéton pourra traverser". Alors qu'une corrélation est possible avec l'état du trafic en temps réel.

La conduite autonome ou le véhicule autonome reste la finalité des objectifs visés par l'industrie ou la recherche. Un objectif qui n'est plus aussi lointain, quand on voit par exemple la démocratisation de l'auto-stationnement ou le développement des véhicules autonome de quelques firmes : Waymo, Tesla, Uber, Navya, Titan, etc. Quelques-uns de ces véhicules sont illustrés sur la Figure1.2.



Figure 1.2 – Véhicules autonomes

Comme nous l'avons déjà mentionné, la principale motivation des systèmes de communica-

tion véhiculaires reste la sécurité et l'élimination du coût excessif des accidents de la route. Selon l'Organisation mondiale de la santé (OMS), les accidents de la route provoquent chaque année environ 1,2 million de décès dans le monde, soit le quart de tous les décès causés par blessures. Environ 50 millions de personnes sont également blessées dans des accidents de la route [97]. Si des mesures préventives ne sont pas prises, la mort sur la route deviendra probablement la troisième cause de décès en 2020 par rapport à une neuvième place en 1990. En 2010, le coût économique total des accidents de la route aux États-Unis était de presque 900 milliards de dollars selon une étude de l'administration nationale de la sécurité routière du département américain des transports. Cela représente la valeur actuelle des coûts économiques pour 33 000 décès, 3,9 millions de blessures non mortelles et 24 millions de véhicules endommagés. Lorsque l'on considère les évaluations de la qualité de vie, la valeur totale des dommages sociétaux causés par les accidents de la route en 2010 était de 836 milliards de dollars [87].

En général, les communications V2I ont été implémentées sur la base de nombreuses normes techniques, telles que IEEE 802.11, dedicated short range communications (DSRC) et Infrarouge. Elles ont été largement déployées pour les applications de tarification routière, mais les coûts d'infrastructure compliquent le calcul des coûts/avantages et exigent des investissements considérables. De plus, les technologies de réseau cellulaire telles que 2G / GPRS / EDGE, 3G / UMTS / HSPA / HSPA + et 4G / LTE ont également été utilisées pour la communication entre véhicules. Aussi, quelques systèmes sont proposés se basent sur un mécanisme secondaire tel que le GPS. D'autre part, le concept de véhicules (principalement voisins) communicants entre eux fait l'objet d'initiatives de recherche et développement depuis de nombreuses années. Toutefois, le niveau d'adoption des techniques V2V dans les véhicules modernes n'a commencé que récemment à augmenter et il est encore loin d'être satisfaisant.

Dernièrement, grâce à la connectivité disponible pour les véhicules, ils ont commencé à être connectés à Internet dans le cadre de l'internet des objets (IoT), donnant naissance à plusieurs applications relevant des communications véhicule à Business (V2B). Enfin, l'utilisation croissante des appareils intelligents a engendré une nouvelle génération d'applications mobiles permettant de connecter à distance le conducteur à son véhicule [2, 3].

L'apport de la vidéo dans les communications véhiculaires apporterait un gain indéniable et permettrait d'envisager diverses applications, dans le but de satisfaire les exigences des passagers et des conducteurs. En effet, le streaming vidéo sur les réseaux véhiculaires pourrait être bientôt nécessaire pour de nombreuses applications. La diffusion vidéo d'informations ou d'informations commerciales aux conducteurs/passagers peut être considérée comme une application importante pour les systèmes de transport. Pour les applications de sécurité, des données visuelles peuvent être utilisées pour montrer clairement la scène de la circulation dans la zone de l'accident. En outre, les contenus vidéo peuvent sauver des milliers de vies lors d'opérations de recherche et de sauvetage en cas d'événement inattendu. La Figure 1.3 page ci-contre illustre un exemple de streaming vidéo V2X.

D'un autre côté, l'ajout de services vidéo dans des réseaux sans fil mobiles rencontre de nombreux obstacles [22]. En effet, les débits relativement élevés exigés par la transmission vidéo exacerbent les différents facteurs affectant la performance des réseaux véhiculaires, tels que la mobilité élevée des véhicules, la modification rapide et permanente de la topologie et les évanouissements rapides des signaux reçus. La vitesse élevée des véhicules peut entraîner une interruption fréquente de la connectivité, ce qui entraîne une dégradation des performances. Par rapport à l'application de transfert de données et même à la vidéoconférence ou à la voix sur IP, la diffusion de contenu vidéo nécessite une plus grande bande passante et un délai de bout en bout limité. Ces exigences ont été prises en compte depuis longtemps dans les réseaux câblés, alors qu'elles constituent encore un espace de recherche dans le domaine des réseaux mobiles dont les réseaux mobiles ad-hoc (MANET). Les véhicules quant à eux utilisent un support partagé, ce

qui réduit la bande passante utilisée. Avec les défis des réseaux véhiculaires ad-hoc (VANET), fournir une qualité vidéo perçue satisfaisante aux besoins du client est un challenge important.

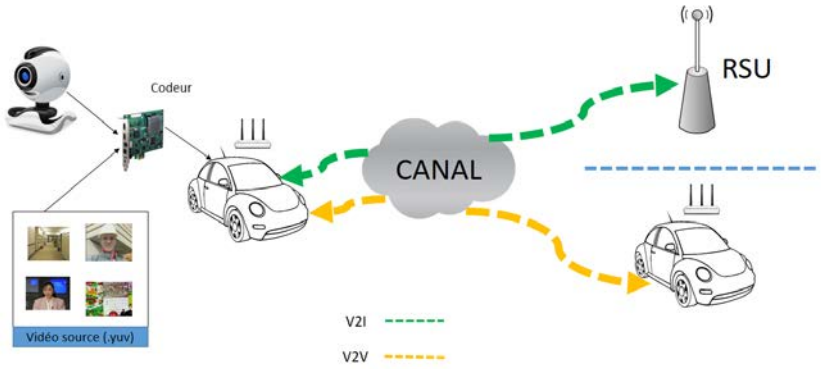


FIGURE 1.3 – Exemple de streaming vidéo V2X.

1.2.2 Applications et exigences du streaming vidéo dans les réseaux véhiculaires :

Dans cette section nous présentons quelques applications de scénarios de mise en œuvre de la diffusion vidéo dans les réseaux véhiculaires que nous avons répertorié. Ainsi que les exigences qu'il faudra remplir :

Gestion de trafic :

Les centres de gestion de la circulation (TMC) servent à contrôler le réseau routier et autoroutier. Ils permettent de surveiller les feux de circulation, les intersections et les routes et déploient de manière proactive des stratégies de gestion de la circulation pour réduire les encombrements et coordonner les autorités étatiques et locales lors d'événements spéciaux, d'urgences ou de trafic quotidien. Ils constituent une source d'information importante. En effet, les opérateurs surveillent un système de télévision en circuit fermé (CCTV) et alertent les autorités compétentes et les chauffeurs (via des panneaux de messages dynamiques ou un site Web) des zones à problèmes, réduisant les accidents et économisant du temps et de l'argent. Les TMC collectent les informations sur l'ensemble du réseau routier à l'aide de capteurs et principalement de caméras. La transmission de la vidéo dans ce genre d'information se fait généralement sur des infrastructures et support dédiés dont les coûts sont considérables. Ceci complique leur généralisation au reste du réseau routier. La démocratisation des communications véhiculaires pourrait être une bonne alternative pour la transmission d'une telle information. Cependant, ce genre d'application nécessite une grande fiabilité et un temps de latence acceptable pour pouvoir être déployé.

Vidéosurveillance :

De nos jours, les comportements antisociaux tels que les crimes, les vols et les actes de terrorisme se sont considérablement accrus. La surveillance vidéo en temps réel à l'intérieur ou à l'extérieur des véhicules peut servir pour prévenir de tels comportements. Dans ce scénario, un véhicule transmet une vidéo codée au réseau d'infrastructure et cette vidéo peut être un appel à un accident de la circulation ou à un état de santé des passagers d'un véhicule accidenté. En outre, une vidéo en direct sur le transport en commun est diffusée au centre de contrôle afin de réduire le taux de criminalité. Cependant, le streaming vidéo en direct à des fins de surveillance est une tâche délicate en raison de l'environnement hostile d'un réseau de véhicules telles que la grande mobilité, la présence de grands obstacles et des conditions de trafic bipolaires [5].

Manœuvre de dépassement :

L'une des principales préoccupations en matière de sécurité routière est une mauvaise manœuvre de dépassement dans les autoroutes où les zones urbaines, ce qui entraîne une série de collisions entre véhicules. Cela entrave sérieusement la fluidité de la circulation et entraîne la congestion de la route ou peut provoquer des accidents en chaîne. Ces accidents de la circulation peuvent être simplement évités si la technique de communication véhiculaire est activée. Plus important encore, la diffusion vidéo en direct depuis un véhicule vers les véhicules qui le suivent augmente la prise de conscience du conducteur des véhicules venant en sens inverse et aide le conducteur dans la prise de décision lors de la manœuvre de dépassement. L'exigence essentielle d'un tel système est un délai de bout en bout strict entre l'obstruction du véhicule et le dépassement des voitures et une qualité vidéo perçue acceptable [7].

Contrôle de véhicule à distance :

Bien que les véhicules autonomes puissent, dans un avenir proche, révolutionner les transports en commun tels que nous les connaissons, une étape de transition semble indispensable via le développement de capacités de surveillance et de contrôle à distance, ce qui contribuera à garantir la sécurité. En effet, l'opération de contrôle à distance apporte un mécanisme de sécurité rendant possible, si nécessaire, la surveillance et le contrôle des véhicules à distance. La transmission de la vidéo aux opérateurs leur permet d'intervenir, ceci est particulièrement envisageable dans situation telle que : les intempéries, l'assistance aux passagers, route en travaux, etc. Celle-ci est certainement l'application qui nécessite la plus grande fiabilité et la plus faible latence.

Communication vidéo pour le divertissement :

Les applications d'info divertissement, font également parties de l'application envisageable. En effet, la vidéo dans les réseaux véhiculaires permet également de véhiculer des informations relatives au confort et au divertissement ainsi qu'une publicité utile aux passagers. Cette application contribue au succès du réseau automobile et accélère sa pénétration sur le marché. En outre, les universités et l'industrie bénéficient des avantages de la communication vidéo pour les services d'info divertissement et de publicité. Les véhicules peuvent échanger des informations vidéo comme des jeux pour se divertir tandis que dans les V2I, l'infrastructure annonce des informations contextuelles sur les lieux touristiques, les actualités mises à jour ou les lieux d'embouteillage.

Ce type d'application est d'autant plus intéressant qu'avec le développement des véhicules autonomes, le véhicule sera amené à devenir un environnement de vie et de travail où l'IPTV et les vidéo-conférences auront parfaitement leurs places. Les futurs véhicules proposeront une

gamme de contenus multimédia, notamment des films HD, des émissions de télévision et des sports (YouTube, Netflix, Amazon Prime Video, etc.). Une telle transmission vidéo nécessite un délai faible et une vidéo de qualité acceptable.

1.2.3 Normes de communication dans les systèmes de transport intelligents

Cette section couvre les dernières normes en matière de communication dans les systèmes de transport intelligents, en particulier en ce qui concerne la communication entre véhicules. Un aperçu de la norme du protocole IEEE 802.11 relative à la communication ITS est discuté. Avec les dernières standardisations de la communication dédiée à courte portée, du DSRC, des spécifications et de la famille de normes IEEE 1609 pour l'accès sans fil dans les environnements véhiculaires (wireless access in vehicular environments (WAVE)). La technologie entièrement distribuée ainsi que les réseaux cellulaires centralisés et basés sur l'infrastructure tels que 3G, 4G et prochainement la 5G sont également brièvement abordés.

Accès sans fil pour les environnements véhiculaires (WAVE) et sa migration vers IEEE 802.11p

L'accès sans fil pour les environnements véhiculaires (WAVE) [44] est une modification approuvée de la norme IEEE 802.11. WAVE est également appelé IEEE 802.11p. WAVE permet de prendre en charge les applications de l'ITS dans les communications à courte portée. La communication entre véhicules (V2V) ou entre les véhicules et l'infrastructure routière (V2I) repose sur la bande de 5,9 GHz (5,85-5,925 GHz), avec l'équipement installé dans la voiture et/ou sur la route [26].

En 1992, les États-Unis ont commencé à étudier la communication dédiée à courte portée (DSRC). C'est le protocole de communication sans fil pour les véhicules. Les États-Unis, l'Europe et le Japon sont les principaux pays de recherche et d'application pour le DSRC. Depuis 2004, la concentration de DSRC a migré vers le groupe standard IEEE 802.11. Le premier DSRC est basé sur la norme IEEE 802.11a, qui se concentre sur les opérations à faible charge. Le standard DSRC est basé sur l'architecture Wireless Fidelity (Wi-Fi). Cependant, afin de prendre en charge les véhicules à grande vitesse et de simplifier les mécanismes du groupe de communication, le groupe de travail de l'IEEE a consacré plus d'efforts au système WAVE, qui est au cœur du DSRC. WAVE assure la collecte et la transmission des informations sur les trafics immédiats et stables, tout en préservant la sécurité des informations. En Europe le standard véhiculaire a été standardisé sous le nom "ITS-G5" et est également basé sur le standard IEEE 802.11p.

La couche physique est presque similaire à la norme IEEE 802.11a et utilise le multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM) en utilisant une modulation d'amplitude en quadrature à 16 niveaux (16QAM) pour sa modulation. Cela conduit à une réduction des interférences intersymboles dues aux effets de propagation par trajets multiples et au Doppler, auxquels le trafic de véhicules en déplacement rapide est fréquemment confronté. Les paramètres de synchronisation ont également été doublés et la bande passante du canal réduite à 10 MHz au lieu de 20 MHz. Cela conduit à un débit réduit allant de 3 à 27 Mbit/s au lieu de 6 à 54 Mbit/s. Le système est conçu pour fonctionner pour un trafic inter-véhiculaire rapproché et la distance de fonctionnement effective des ondes radio est fixée dans la norme pour être efficace jusqu'à une distance de 1000 mètres lorsque le véhicule se déplace à une vitesse maximale de 200 km/h. Il a donc fallu changer les caractéristiques et rendre le protocole plus robuste en raison de la vitesse de déplacement des véhicules. La couche MAC, quant à elle, a des adresses MAC aléatoires, une qualité de service (QoS) intégrée avec des priorités, des fonctionnalités qui sont également présentes dans l'IEEE 802.11e [38, 71]. La couche MAC prend également en charge l'accès multicanal et multi-radio. De même, elle reprend le principe du CSMA/CA

(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance). La qualité de service est un facteur important pour que les messages critiques pour la sécurité puissent être transportés et relayés en priorité, tandis que le type de données de divertissement peut être relégué pour avoir une classe de service inférieure. Ces différents mécanismes de contrôle de la qualité de service et des accès ont été empruntés au protocole IEEE 802.11e.

Le reste de la pile protocolaire de DSRC se situe entre la couche liaison et la couche application. Par conséquent, IEEE 1609 est un standard pour les couches hautes sur lequel IEEE 802.11p se base [35]. La famille des standards IEEE 1609 pour WAVE, se décompose en quatre standards : pour la gestion des ressources (IEEE 1609.1 - WAVE Resource Manager), pour la sécurisation des messages (IEEE 1609.2 – WAVE Security Services for Applications and Management Messages) pour les services de niveau réseau et transport incluant l'adressage, le routage (IEEE 1609.3 - WAVE Networking Services), et pour la coordination et la gestion des 7 canaux DSRC (IEEE 1609.4 - WAVE Multi-Channel Operation). La Figure 1.4 illustre les différentes piles protocolaires.

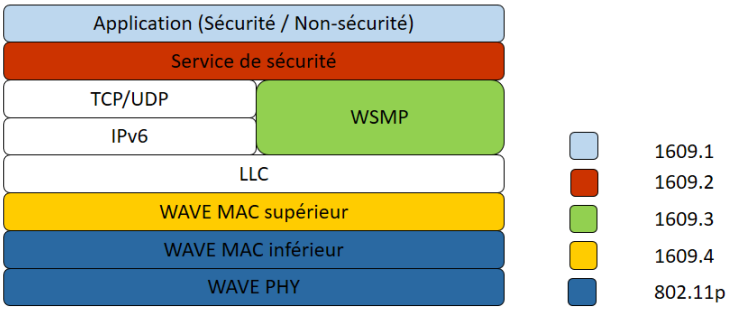


FIGURE 1.4 – La pile de protocoles WAVE/DSRC.

L'espacement des canaux WAVE pour les États-Unis et l'Europe est indiqué à la Figure 1.5. La gamme de fréquences et les canaux sont strictement réglementés, mais l'utilisateur ne supportera aucun coût de licence. L'attribution des canaux aux États-Unis et en Europe permet d'utiliser quatre canaux de service pour les applications et un canal de contrôle. Cependant, les États-Unis ayant une gamme de fréquences étendues ont deux canaux supplémentaires : le canal 172 pour "Sécurité critique de la vie utile" et le canal 184 pour les applications "Hi-Power Public Safety".

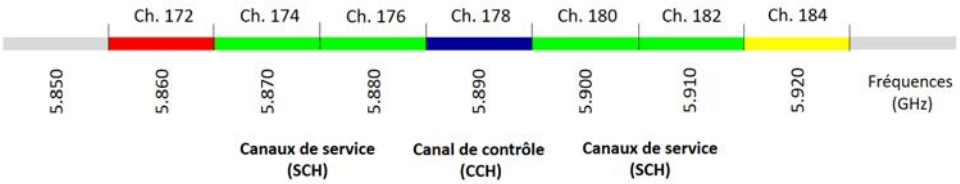


FIGURE 1.5 – L'espacement des canaux WAVE.

Infrastructures de communication mobile 2G et 3G

La technologie de réseau mobile (cellulaire) la plus répandue est le GSM (Global System for Mobile communication). Le GSM a été conçu principalement pour la téléphonie vocale, mais

une gamme de services support a été définie (un sous-ensemble de services disponibles pour les réseaux numériques à intégration de services, RNIS), permettant des connexions de données à commutation de circuits pouvant atteindre 9600 bits/s. La technologie derrière le système mondial de communication mobile (GSM TradeMark) utilise la modulation GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying), une variante de la modulation de phase (PSK) avec la signalisation TDMA (accès multiple par répartition dans le temps) sur les porteuses duplex à répartition de fréquence (FDD). Bien que conçu à l'origine pour fonctionner dans la bande des 900 MHz, il a rapidement été adapté à 1800 MHz. Avec le temps, plusieurs standards et techniques ont vu le jour et les débits de connexion ont considérablement augmenté. Ce qui a permis d'atteindre des débits de transmission bruts d'environ 14 Mbit/s. Le « long terme évolution » (LTE) est venu après étendre la technologie radio.

Technologies 4G et 5G

Compte tenu des diverses exigences de performance d'un large éventail d'applications réseau et du coût du déploiement d'une infrastructure routière spécialisée, la recherche s'oriente actuellement vers l'étude des avantages de l'exploitation des normes de communication mobile existantes/émergentes (standard LTE-V2X ou C-V2X) [37, 94]. Particulièrement la norme 5G prévue en 2020 et dont les applications véhiculaires sont l'une des thématiques ciblées. En effet, son aspect Device-to-Device-D2D est un mécanisme approprié pour la fourniture d'applications automobiles. L'autre objectif affiché de la 5G étant la latence ultra basse (ultra-low latency) permettra son déploiement dans la conduite autonome [70]. Il est prévu que les technologies mobiles de nouvelle génération (4G / 4G +, 5G), y compris la mise en réseau D2D et les communications à très faible latence, constitueront des solutions technologiques alternatives à la norme 802.11p. L'idée principale de cette tendance est d'exploiter les normes sans fil émergentes pour tirer parti des infrastructures de télécommunication et des données (réseau) existantes des opérateurs de réseaux mobiles, afin de fournir des solutions innovantes. À cet égard, les infrastructures 4G/5G sont exploitées pour les communications V2V/V2I comme alternative aux approches conventionnelles basées sur l'utilisation d'infrastructures/unités routières (RSU). Cette solution pourrait promettre des avantages multidimensionnels, car elle promet une latence réduite, une fiabilité accrue et un modèle de pénétration du marché plus efficace et omniprésent.

Analyse et standard considéré dans la thèse

L'analyse réalisée montre que la plupart des standards peuvent être envisagés pour le large éventail d'applications et de scénarios identifiés dans les applications V2X. Néanmoins, le cas de la transmission vidéo nécessite l'utilisation des derniers standards cellulaires ou du standard dédié IEEE 802.11p.

Ainsi, le fait que les réseaux cellulaires soient déjà en place dans le monde est souvent cité comme une raison d'utiliser les solutions cellulaires pour V2X. L'argument principal est que l'infrastructure cellulaire étant déjà présente, il n'est donc pas nécessaire d'investir et de déployer une nouvelle infrastructure pour l'IEEE 802.11p. Mais, il est à prendre en considération que l'infrastructure actuelle n'est pas équipée pour prendre en charge les nombreux cas d'utilisation V2X nécessitant une faible latence.

Il est important de noter également que la technologie basée sur la norme 802.11p, sous la forme d'unités bord de route (RSU), peut être déployée dans une grande partie de l'infrastructure routière existante. Contrairement à l'infrastructure cellulaire, qui nécessite l'expansion de nouvelles tours de stations de base, l'infrastructure 802.11p peut utiliser les structures existantes, ce qui représente une économie importante en termes de déploiement à court et à long terme. De plus, la plage de fréquences de l'IEEE 802.11p a déjà été attribuée dans le monde entier. Comme

décrit précédemment, la région de 5,9 GHz comprend 75 MHz de bande passante réservée aux services V2X basés sur 802.11p. C'est l'un des plus grands atouts de 802.11p. En outre, la norme IEEE 802.11p offre de meilleures performances en termes de délai et permet un délai de bout en bout inférieur à 100 ms [33, 92, 37].

Les constructeurs automobiles et les fournisseurs d'infrastructure doivent prouver leur conformité aux normes et pourront alors simplement opérer dans la région des 5,9 GHz. Pas besoin d'abonnements ou d'accords d'itinérance. Un autre point étant que les fournisseurs actuels de services cellulaires sont déjà confrontés à des problèmes de bande passante, compte tenu de l'activité grandissante des consommateurs et de l'extension de l'IoT, et peuvent avoir des difficultés à répondre aux exigences techniques et commerciales de V2X. En revanche, les solutions éprouvées sur le terrain et testées en conformité avec la norme 802.11p sont prêtes dès maintenant et peuvent être déployées à grande échelle, dans le monde entier, à tout moment. D'où le choix d'utiliser le standard IEEE 802.11p durant la thèse, que nous pensons le plus approprié aux déploiements des applications V2X aujourd'hui [14, 92]. Mais nous croyons également à la compatibilité entre le monde wifi et le monde cellulaire. En effet, de nombreuses solutions sont en train de voir le jour pour fusionner les deux afin de créer un système de réseau véhiculaire hétérogène qui exploite le meilleur des deux.

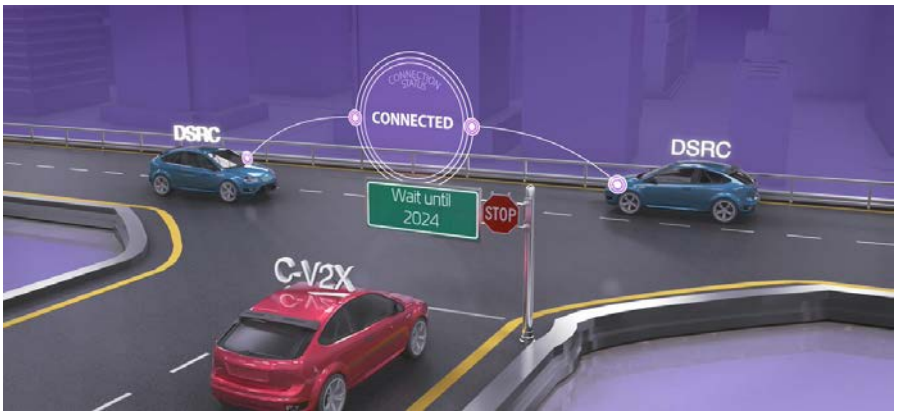


Figure 1.6 – DSRC vs C-V2X.

1.3 Codage et transmission de la vidéo numérique

Le domaine des communications multimédia et plus particulièrement de la transmission vidéo ont connu une évolution fulgurante et la quantité des informations multimédia échangée sur les réseaux ne cesse de croitre selon [18]. Ainsi, les performances des systèmes multimédia s'améliorent chaque jour pour répondre aux exigences de plus en plus élevées en termes de qualité, temps de traitement et restriction de la bande passante. Selon un rapport Cisco, à l'échelle mondiale, le trafic vidéo sur IP représentera 82% de l'ensemble du trafic Internet grand public d'ici 2021, contre 73% en 2016 [18].

La compression vidéo s'impose comme un outil indispensable pour répondre à ces développements et les systèmes de compression sont utilisés dans la vie courante, les groupes internationaux de standardisation tels que l'ITU-T et l'ISO/IEC travaillent continuellement pour améliorer les performances des normes de compression, en particulier celles relatives à la compression vidéo.

Dès le début des années 1990, les standards H.261, MPEG-1, MPEG-2 / H.262, H.263, et MPEG-4 (Part 2) ont commencé à apparaître avec toujours la recherche du meilleur compromis coût-performances. Le standard ITU-T H.264 / MPEG-4 (Part 10) Advanced Video Coding, beaucoup plus connu sous la désignation H.264/AVC, a été jusqu'à 2013, le dernier de la série [78]. En Janvier 2013, le High Efficiency Video Coding (HEVC) standard nommé H.265 voit le jour [85].

Le signal vidéo numérique, se caractérise par sa résolution spatiale et sa résolution temporelle. La résolution temporelle correspond à la cadence de l'animation, exprimée en nombre d'images par seconde (fps ; Frame Per Second). La résolution temporelle est généralement supérieure ou égale à 25 fps du fait que l'œil humain, pour un observateur moyen, est capable de distinguer jusqu'à 20 images par seconde.

La définition qui peut être par abus de langage être confondue avec la résolution spatiale est définie par le couple nombre de lignes (nombre de pixels sur l'axe vertical) et par nombre de colonnes (nombre de pixels sur l'axe horizontal) dans chaque image. En fonction de l'application ou du service visé, plusieurs résolutions et formats sont utilisés. La grande majorité des formats est dérivée soit de standards vieillissants NTSC (National Television System Committee ; 720 x 480), PAL (Phase Alternating Line ; 720 x 576) soit de la télévision numérique haute définition (TVHD), les formats les plus importants sont regroupés comme suit :

— SIF (Standard Interchange Format ; 352x240) dérivés du NTSC avec une résolution temporelle de 30 fps.
— CIF (Common Intermediate Format ; 352x288), dérivés du PAL avec une résolution temporelle de 25/30 fps.
— QCIF (Quart de CIF ; 176x144), dérivés du PAL avec une résolution temporelle de 25/30 fps.
— Formats DVD dérivés du PAL et du NTSC (NTSC : 720 × 480, PAL : 720×576), ces formats sont appelés également SD (Standard Definition).
— Formats Full HD (1920×1080) et HD (1280×720) utilisé par la TVHD.

La compression d'images et de la vidéo, doit appliquer une opération de sous-échantillonnage avant de procéder au codage de l'information. Cette opération consiste à atténuer la résolution spatiale de l'image en diminuant le nombre de lignes et/ou de colonnes et ainsi, la quantité d'informations à coder. Tous les standards de compression qui utilisent un espace chromatique, favorisent le sous-échantillonnage des composantes de chrominance. Ce choix est motivé par la sensibilité réduite de l'œil humain aux variations de chrominances (Cb, Cr) qu'aux variations de luminance (Y). Plusieurs modes de sous-échantillonnage sont utilisés dans la littérature dont les plus importants sont :

— 4 : 4 : 4 (garde l'information entière de l'image)
— 4 :2 :2 (Cb et Cr sont décimés de ½)
— 4 : 1 : 1 (un pixel sur quatre est maintenu avec 1/4 des Cb et Cr pour chaque ligne)
— 4 : 2 : 0 (un pixel sur quatre est maintenu avec 1/2 des Cb et Cr pour chaque ligne et colonne)

Les données d'une vidéo numérique sont généralement structurées en couches selon le schéma suivant :

Séquence {Groupe d'images (GOP){Image (frame){Groupe de blocs (GOB){Macrobloc (MB){Bloc{sous-bloc}}}}}}.

Un GOP est une collection d'images codées, comprises entre deux images encodées en intra. Avec l'encodage H.264, l'image peut être encodée suivant trois modes :

— Codage intra (I-frame),
— Codage prédictif (P-frame),
— Codage prédictif bidirectionnel (B-frame).

L'ordre de ces codages est fixe, avec une image I en début de GOP, puis un motif répétitif d'images B et d'images P jusqu'à la fin du GOP tel qu'indiqué par la Figure 1.7. La fréquence des images I est variable, elle donne la taille du GOP. Les images I sont indispensables pour que le décodeur puisse entreprendre la chaîne de prédiction.

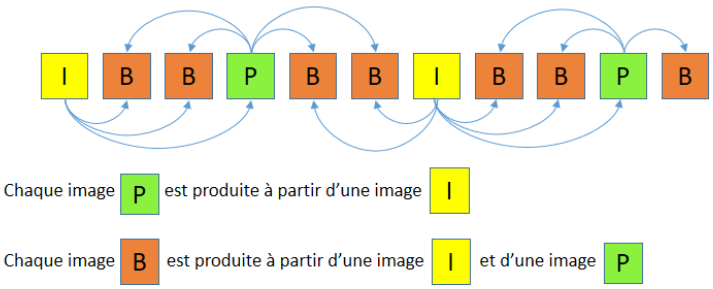


FIGURE 1.7 – Composition d'un groupe d'images (Group Of Picture GOP).

La notion de slice a été introduite dans la norme H.264/AVC, elle est composée d'un nombre de macroblocs d'une image. De plus elle est indépendamment décodable apportant une limitation intrinsèque à la propagation des erreurs et une plus grande flexibilité.

Comme mentionné précédemment, il existe plusieurs organismes internationaux composés de chercheurs universitaires et d'industriels et dont le but principal est de développer des standards de compression vidéo aussi performants que possible pour répondre aux besoins croissants du multimédia.

Depuis 1990 plusieurs normes se sont défilées, chacune d'entre elles a apporté un ajout et un gain de compression, toutes se sont basées sur deux étapes :

La prédiction intra-image

La prédiction Intra-image permet d'exploiter la redondance spatiale présente dans l'image courante sans avoir besoin d'aucune image de référence. La prédiction d'un bloc intervient toujours dans le domaine spatial en se référant aux échantillons voisins de blocs déjà codés. Un bloc prédit est donc construit à partir de ses voisins déjà codés, décodés et construits. Il est ensuite soustrait au bloc original et le bloc de différence est codé et transmis. Chaque bloc appelé également macrobloc est un ensemble de pixels dont le nombre varie sur l'encodeur et selon sa prédiction. Il peut être transmis en choisissant un type de codage parmi d'autres mais en fonction de celui désigné pour le codage de la slice. Dans tous les types de codage de slices, plusieurs modes de prédiction peuvent exister. Pour le H.264/AVC par exemple deux classes de codage Intra sont pris en charge : Intra-4x4 et Intra-16x16. Dans le mode Intra- 4x4, chaque bloc 4x4 de luminance recourt à un des neuf modes de prédiction. Dans le mode Intra-16x16, une prédiction uniforme est réalisée pour l'ensemble de la luminance d'un macrobloc. Quatre modes de prédiction coexistent. La prédiction Intra au-delà des limites de la slice n'est pas autorisée à maintenir l'indépendance des slices les unes par rapport aux autres.

La prédiction inter-image

Outre les types de codage Intra des macroblocs, plusieurs types de codage prédictif ou à compensation de mouvement sont définis pour les macroblocs d'une slice spécifique à une image de prédiction inter. En effet, la prédiction inter crée un modèle de prédiction à partir d'une ou plusieurs images vidéo codées précédemment au moyen de l'estimation et de la compensation de mouvement afin de réduire les corrélations temporelles. Ainsi, les macroblocs peuvent être prédits à partir d'une image précédente ou suivante et la prédiction de mouvement ne se limite pas à une seule image de référence. En effet, la prédiction de mouvement se base sur toutes les images disponibles dans la mémoire. En d'autres termes, deux blocs d'une même image peuvent avoir plusieurs images de références.

1.3.1 Les dernières normes d'encodage vidéo

Après le succès de la norme H.264/AVC fruit de la collaboration entre l'ITU-T Video Coding Expert Group et le ISO/IEC MPEG via le JCT-VC, Joint Collaborative Team on Video Coding, reste en 2017 l'encodeur le plus utilisé à hauteur de 79% [32]. La même équipe a repris la collaboration pour l'élaboration du H.265 (HEVC) et a réussi à doubler l'efficacité de compression par rapport à son prédécesseur le H.264. Dans cette partie nous allons présenter les deux derniers standards de codage vidéo à savoir le H.264/AVC et le H.265/HEVC :

H.264/AVC

Le H.264 appelé également MPEG-4 Part 10 ou AVC (Advanced Video Coding) est un standard très performant pour la compression vidéo et reste de nos jours le standard de compression le plus utilisé. Le standard H.264/AVC est venu apporter un gain de 50% en compression en comparaison à MPEG-2 et est utilisé dans diverses applications. En effet, la norme H.264/AVC a été conçue pour des performances de compression améliorées avec des fonctionnalités réseau conviviales pour répondre à un large éventail d'applications incluant des applications conversationnelles (par exemple, vidéoconférence) et non conversationnelles (stockage, streaming et diffusion). La norme H.264/AVC est considérée comme une avancée majeure dans l'efficacité du codage grâce à plusieurs mécanismes dans l'amélioration de la prédiction intra et inter ainsi que dans les schémas de transformées et de codage entropique.

H.265/HEVC

La dernière norme de codage vidéo développée, à savoir le HEVC a pour principal objectif un codage vidéo à haut rendement pour le contenu ultra haute définition (UHD). Cette nouvelle norme a introduit de nouveaux outils pour offrir la même qualité vidéo à un débit binaire réduit en comparaison au H.264/AVC. Nous fournissons une vue d'ensemble des caractéristiques techniques de HEVC dans la prochaine section et détaillons les différents apports du codeur en utilisant H.264/AVC comme référence. Différents aspects du HEVC seront développés durant le reste du manuscrit. La Figure1.8 montre le gain en débit binaire du HEVC par rapport au H.264/AVC et au MPEG2.

1.3.2 Vue d'ensemble du standard H.265/HEVC

Le structure H.265/HEVC comme son prédécesseur le H.264/AVC se décompose en deux couches : la couche de codage vidéo ou VCL (Video Coding Layer), et la couche d'abstraction réseaux ou NAL (Network Abstraction Layer).

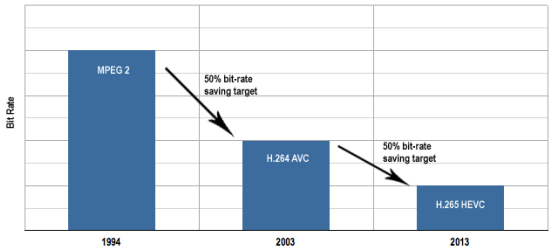


FIGURE 1.8 – Gain du HEVC en débit binaire.

— La VCL, est spécifiée pour représenter efficacement le contenu des données vidéo. C'est la sortie du processus de codage, séquence de bits représentant les données vidéo codées, qui sont encapsulés dans des unités NAL avant d'être transmises ou stockées.
— La NAL est définie pour permettre l'usage de la même syntaxe vidéo dans l'environnement réseau. Cette couche sert à distinguer la couche vidéo VCL de la couche de transmission sur le réseau. Ceci, inclut des possibilités telles que des paramètres de séquence (SPS : Sequence parameter set) et d'image (PPS : picture parameter set) représentant respectivement les entêtes et les principaux paramètres caractéristiques de la séquence et de l'image. Elles offrent plus de robustesse et de flexibilité.

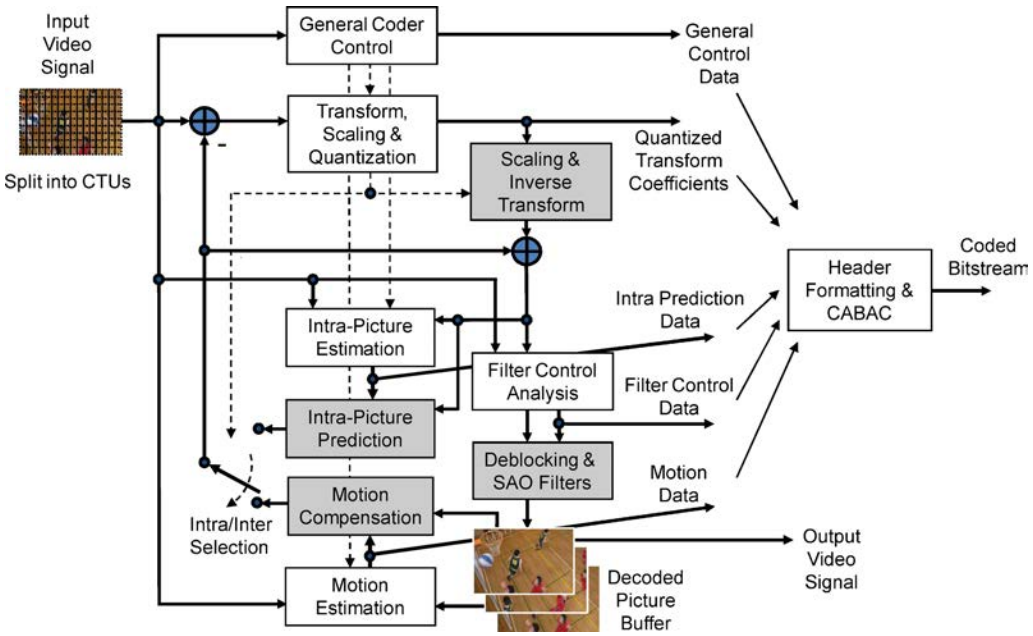


FIGURE 1.9 – Encodeur vidéo typique HEVC (avec des éléments de modélisation de décodeur en gris clair).

D'un point de vue conceptuel, la norme H.265/HEVC reprend le même procédé utilisé dans les normes précédentes. Elle s'appuie sur un codage hybride par transformée avec estimation/compensation de mouvement. Le gain du rendement d'encodage résulte de plusieurs évolutions sur différents aspects de la chaîne d'encodage. La Figure 1.9 représente le schéma

synoptique d'un codeur vidéo H.265(HEVC). Les principales nouveautés introduites dans le H.265/HEVC par rapport au H.264/AVC sont les suivantes :

Le codage CABAC

Remplaçant les codages de type Variable Length Coding le codage arithmétique CABAC (Context-Adaptive Binary Arithmetic coding) est aujourd'hui, grâce à ses performances, systématiquement utilisé. Il a d'abord été utilisé uniquement par les profils les plus élevés par le H.264/AVC à cause de sa relative complexité. C'est un codeur de type statistique à longueur variable et sans perte. Comme son nom l'indique, Cet encodage, relativement complexe, encode par paquets d'éléments de syntaxe en tenant compte du contexte. Le gain de compression du CABAC par rapport au VLC est de l'ordre de 10%.

La fin des macroblocs pour un découpage des pixels adapté à chaque fonction

Les images d'un flux vidéo sont habituellement découpées en carrés de 16 pixels de côté (les macroblocs), qui à leur tour sous-divisés en blocs de 8×8 pixels considérés ensuite comme unité de données. Le standard H.265 subdivise les images en unités appelées coded tree units (CTU) de 16, 32 ou 64 pixels de largeur qui elles-mêmes sont ensuite partitionnées en coding units (CU). Chaque CTU peut être divisée en 4 CU, qui elles-mêmes peuvent contenir 4 CU, et ainsi de suite de manière récursive au maximum 3 fois. Ce découpage adaptatif permet aux encodeurs de s'adapter à la statistique locale augmentant par voie de conséquence les performances : un meilleur gain et une meilleure qualité d'image. Bien entendu, au détriment d'une complexité accrue des codeurs matériels qui doivent constamment ajuster leur débit de données pour répondre aux contraintes imposées au codeur. La Figure1.10 illustre la différence entre le découpage H.264/AVC et celui du HEVC.

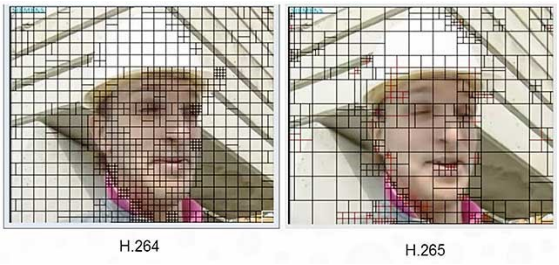


Figure 1.10 – Comparaison entre le découpage du H.264/AVC et du H.265.

Prédiction intra-image angulaire

La prédiction angulaire du HEVC est conçue pour modéliser différentes structures directionnelles liées au contenu image et/ou vidéo. Cela est d'autant plus important que le nombre de directions de prédiction intra supportées par le HEVC dépasse de loin ceux des codecs vidéo précédents. En comparaison au H.264/AVC, le nombre d'angles de prédictions intra passe de 9 angles pour le H.264/AVC à 35 pour le HEVC.

Prédiction inter-image

Par rapport aux codecs préexistants, la prédiction inter-image a été améliorée en passant la précision sur les vecteurs de mouvement du demi-pixel en H.264 au quart de pixel (codage sur

16 bits par vecteur). La dynamique des vecteurs de mouvement est aussi augmentée qui peut être pour la luminance de -8192 à 8191.75 pixels (de -2048 à 2047.75 horizontalement et -512 to 511.75 verticalement pour l'AVC).

Traitement parallèle

Pour permettre la parallélisation du décodage des flux vidéo le standard H.265 ajoute plusieurs modes de décodage dont les plus importants sont le « Tiles » (tuiles) et le « Wavefront » (front d'onde). L'image est fractionnée en une grille rectangulaire de CTBs (tiles). Les prédictions inter et intra images ne s'effectuent pas au-delà des limites d'un Tile. Avec le mode Wavefront, chaque ligne de CTB peut être encodée et décodée par son propre thread. Les codages/décodages de lignes multiples sont synchronisés de telle sorte que chaque ligne étant en légère avance de phase par rapport à la suivante garantissant que les données soient disponibles lorsqu'un thread fait appel aux résidus de la CTB précédente (de dessus).

Résolution d'image

Le standard H.265 permet des résolutions jusqu'au 8K alors que le H.264/AVC n'accepte que le 4K que dans sa version améliorée XAVC introduite par la firme Sony.

Gain de bande passante

H.265 ayant énormément porté l'effort sur les boucles de filtrage, le consortium a décidé d'appliquer des mesures de gain de bande passante par comparaisons subjectives. Des tests en termes de décodage vidéo ont été confrontés à des flux en H.264/AVC et des flux H.265, et, à qualité visuelle égale, on peut voir un gain de bande passante en moyenne aux alentours de 50%, avec des pics à 60% sur certains profils.

Dans le cadre de cette thèse, les deux derniers standards d'encodage seront considérés, à savoir le H.264/AVC et plus particulièrement le H.265/HEVC. En effet, nous verrons par la suite que le HEVC offre de nouvelles techniques de prédiction temporelles. Dont nous tirerons profit dans le cadre de nos travaux, une distinction est développée selon l'importance de chaque image en considérant différents types de structures de prédiction temporelle.

1.4 Approche inter-couche

Récemment, il y a eu une multitude de propositions de conception inter-couches pour les réseaux sans fil. Un certain nombre de chercheurs se sont penchés sur des aspects spécifiques de la performance du réseau et à la lumière de leur interprétation ont présenté plusieurs propositions de conception à plusieurs niveaux [81]. Ces propositions impliquent différentes couches de la pile de protocoles et concernent à la fois les réseaux cellulaires et ad hoc. Des travaux ont également été réalisés sur la mise en œuvre des interactions entre couches.

Il a souvent été soutenu que même si les architectures en couches ont bien servi les réseaux câblés, elles ne conviennent pas aux réseaux sans fil. Pour illustrer ce point, les chercheurs présentent généralement ce qu'ils appellent une proposition de conceptions inter-couche (Cross-layer). Ainsi, il y a eu récemment un grand nombre de propositions de conception en couches croisées inter-couches. De manière générale, la conception inter-couches fait référence à la conception du protocole en exploitant activement la dépendance entre les couches de protocoles pour obtenir des gains de performance. Il existe plusieurs interprétations de la conception de couches croisées. Cela est probablement dû au fait que l'effort de conception inter-couches a

été effectué de manière plutôt indépendante par des chercheurs de différents horizons, qui travaillent sur différentes couches de la pile [76].

1.4.1 Définition de la conception de inter-couche (cross-layer)

Une architecture en couches, comme le modèle d'interconnexion de systèmes ouverts à sept couches (OSI) ou le modèle TCP/IP illustrés sur la Figure1.11, divisent la tâche du réseau global en couches et définissent une hiérarchie de services à fournir par les couches individuelles. Les services des couches sont réalisés en concevant des protocoles pour les différentes couches. L'architecture en couches, interdit la communication directe entre les couches non adjacentes. De plus, la communication entre les couches adjacentes est limitée aux appels de procédure et aux réponses. L'alternative à l'architecture en couches, c'est des protocoles conçus en violant l'architecture de référence, par exemple, en permettant une communication directe entre les protocoles sur des couches non adjacentes ou en partageant les variables entre les couches. Une telle violation d'une architecture en couches est une conception en couches croisées par rapport à l'architecture de référence.

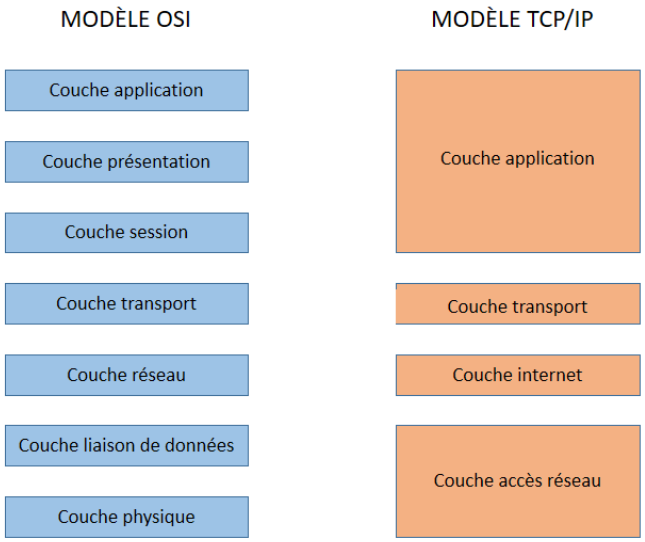


Figure 1.11 – Deux modèles d'architecture en couche l'OSI et le TCP/IP

La conception inter-couches (cross-layer) se réfère à la conception de protocole en exploitant activement les dépendances entre les couches afin d'obtenir des gains de performance : une couche se base sur certains détails de conception d'une autre couche. Ces couches peuvent être adjacentes, ou même non adjacentes dans la pile. Cette conception peut être vue comme une approche coopérative où l'adaptation est coordonnée entre les couches multiples du système de communication. Initialement, des conceptions cross-layer ont proposé de simplement fusionner deux couches adjacentes afin d'effectuer les mêmes fonctionnalités. Un exemple commun est la fusion des couches de PHY (physique) et MAC (liaison).

1.4.2 Aperçu des propositions de conception à travers les couches

Comme mentionné, il existe de nombreuses propositions de conception inter-couches dans la littérature. Les auteurs présentent une étude de plusieurs propositions de conception en couches croisées tirées de la littérature et basées sur les couches couplées. Ici, nous sommes plus intéressés par la façon dont les couches sont couplées, en d'autres termes, quel type de violation d'architecture a eu lieu dans une conception de couche transversale particulière. Nous notons que l'architecture en couches peut être adaptée de plusieurs manières :

— Création de nouvelles interfaces 1.12.a,
— Fusion de couches adjacentes 1.12.b,
— couplage de conception sans nouvelles interfaces 1.12.c,
— Calibrage vertical sur plusieurs couches 1.12.d.

La plupart des propositions de conception inter-couches dans la littérature entrent dans l'une de ces catégories. Les différentes conceptions sont illustrées sur la Figure 1.12. Nous allons maintenant discuter plus en détail des quatre catégories mentionnées. Néanmoins, les violations architecturales identifiées peuvent être combinées pour donner des conceptions à couches croisées plus complexes.

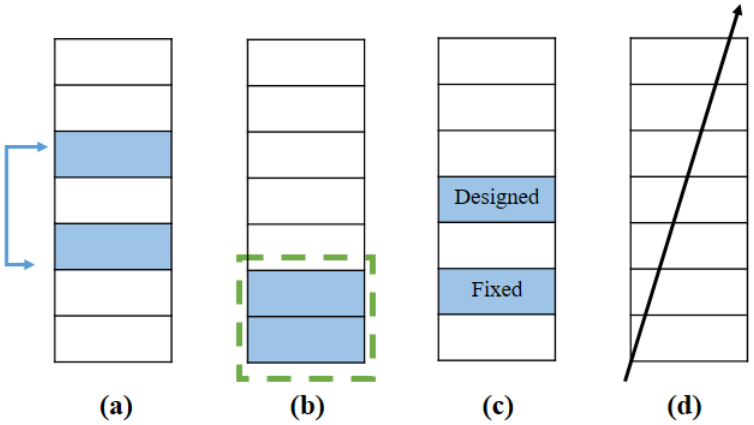


FIGURE 1.12 – Les différentes conceptions inter-couche

Création de nouvelles interfaces

Plusieurs conceptions inter-couches proposent la création de nouvelles interfaces entre les couches [83]. Les nouvelles interfaces sont utilisées pour le partage d'informations entre les couches lors de l'exécution. La violation de l'architecture ici est évidemment la création d'une nouvelle interface non disponible dans l'architecture en couches. Nous divisons en outre cette catégorie en trois sous-catégories en fonction de la direction du flux d'informations le long des nouvelles interfaces :

— vers le haut : des couches inférieures à une couche supérieure,
— Vers le bas : de couches supérieures à couche inférieure,
— Dans les deux sens : flux itératif entre deux couches.

Dans la littérature, on peut trouver des exemples des trois sous-catégories. Nous allons développer ces trois interfaces.

1. Flux d'information vers le haut :
   Un protocole de couche supérieure nécessitant des informations provenant de la ou des couches inférieures lors de l'exécution entraîne la création d'une nouvelle interface depuis la ou les couches inférieures jusqu'à la couche supérieure. Par exemple, si le chemin TCP de bout en bout contient une liaison sans fil, les erreurs sur la liaison sans fil peuvent inciter l'expéditeur du protocole TCP à tirer des conclusions erronées sur l'encombrement du réseau, ce qui entraîne une dégradation des performances. La création d'interfaces à partir des couches inférieures vers la couche de transport pour permettre des notifications explicites permet de réduire ces situations. Par exemple, la notification de congestion explicite (ECN) du routeur à la couche de transport au niveau de l'expéditeur TCP peut indiquer explicitement à l'expéditeur TCP s'il y a un encombrement sur le réseau pour lui permettre de différencier les erreurs sur la liaison sans fil et la congestion du réseau.
2. Flux d'information vers le bas :
   Certaines propositions de conception inter-couches reposent sur la définition de paramètres sur la couche inférieure de la pile lors de l'exécution, à l'aide d'une interface directe provenant d'une couche supérieure. À titre d'exemple, les applications peuvent informer la couche de liaison de leurs exigences en matière de délais et la couche de liaison peut alors traiter les paquets d'applications sensibles au délai avec la priorité. Le flux d'information ascendant sert à informer les couches supérieures des conditions réseau sous-jacentes. Le flux d'information descendant est destiné à fournir des indications aux couches inférieures sur la manière dont les données d'application doivent être traitées.
3. Flux d'information dans les deux sens :
   Deux couches, exécutant différentes tâches, peuvent collaborer entre elles lors de l'exécution. Souvent, cela se manifeste par une boucle itérative entre les deux couches, les informations circulant entre elles. Clairement, la violation de l'architecture est ici les deux nouvelles interfaces complémentaires.

Fusion de couches adjacentes

Une autre façon de concevoir des couches croisées consiste à concevoir deux ou plusieurs couches adjacentes de manière à ce que le service fourni par la nouvelle super-couche soit la réunion des services fournis par les couches constituantes. Cela ne nécessite aucune nouvelle interface à créer dans la pile. Du point de vue architectural, la super-couche peut être interfacée avec le reste de la pile en utilisant les interfaces qui existent déjà dans l'architecture d'origine.

Couplage de conception sans nouvelles interfaces

Une autre catégorie de conception inter-couches consiste à coupler plusieurs couches au moment de la conception sans créer d'interfaces supplémentaires pour le partage d'informations lors de l'exécution. Bien qu'aucune nouvelle interface ne soit créée, le coût de l'architecture ici est qu'il peut ne pas être possible de remplacer une couche sans apporter les modifications correspondant à une autre couche.

Calibrage vertical sur plusieurs couches

La dernière catégorie dans laquelle les propositions de conception inter-couches, adaptées aux caractéristiques des normes, est ce que nous appelons le calibrage vertical entre les couches. Comme son nom l'indique, il s'agit d'ajuster les paramètres qui s'étendent sur plusieurs couches. La motivation est facile à comprendre. Fondamentalement, les performances observées au

niveau de l'application dépendent des paramètres de toutes les couches situées en dessous. Par conséquent, il est concevable que le réglage conjoint puisse aider à obtenir de meilleures performances.

1.4.3 Conception multicouche pour la diffusion vidéo sans fil

Les interactions entre les différentes couches du protocole réseau peuvent être optimisées conjointement dans la conception de systèmes de bout en bout afin d'améliorer les performances [80]. Pour cela, deux approches sont largement utilisées dans la diffusion vidéo sans fil et sont considérées comme deux sous-ensembles de la conception à couches multiples :

— L'optimisation des caractéristiques réseaux en fonction du contenu.

— Le traitement multimédia adaptatif au réseau.

L'idée est d'adapter les stratégies de gestion et de protection des ressources dans les couches inférieures pour optimiser les caractéristiques spécifiques des applications multimédia. Cette dernière approche se base sur l'information retournée par les couches inférieures pour adapter les algorithmes de compression et de diffusion multimédia.

1.4.4 Pourquoi la conception en inter-couche ?

Comme nous l'avons vu, le système de mise en réseau est conçu sur la base d'une architecture en couches telles que OSI ou TCP / IP, où chaque couche se concentre sur la résolution de problèmes de conception différents. Par exemple, la couche physique (PHY) minimise les erreurs lors des transmissions, la couche d'accès au support (MAC) traite de l'accès au canal, la couche réseau gère les problèmes de routage et la couche transport gère les problèmes de contrôle d'encombrement. Toutefois, l'objectif initial de l'architecture de réseau en couche actuelle est de prendre en charge des services de données simples, insensibles aux délais et intolérants avec peu de qualité de service, ne prenant pas en charge les services multimédias sensibles aux délais, à la bande passante et aux pertes. Par conséquent, adapter les services multimédias à la future conception de réseau sans fil devient un problème très difficile. La méthodologie de conception inter-couches fournit un nouveau concept, dans lequel les interactions entre les différentes couches de protocoles sont utilisées pour obtenir les meilleures performances de service de bout en bout.

1.5 Travaux connexes

Le domaine des transmissions multimédias sur les réseaux véhiculaires est largement investigué dans la littérature. Le choix de l'encodeur vidéo est d'une grande importance sur la qualité visuelle à la réception. En effet, parmi les normes de codage vidéo existantes, le dernier HEVC a démontré des gains de compression importants et une grande résilience pour une transmission à haut taux de perte [74]. Dans [69] les auteurs ont étudié la qualité reçue des flux de données vidéo compressés après transmission dans un réseau VANET. Les encodeurs vidéo H264, H265 et VP9 (développé par google visant à concurrencer HEVC) ont été pris en compte. Ainsi, leurs recherches ont montré que les codeurs H.265 et VP9 de nouvelle génération offrent une meilleure qualité de réception vidéo. Torres et al. dans [90] sont parvenus à la même conclusion après une comparaison entre les normes de codage vidéo H.264/AVC et H.265 sur des réseaux véhiculaires sujets aux erreurs avec une perte de paquets élevée. Une étude portant sur la possibilité de transmission en temps réel dans un schéma V2V a également été abordée dans [89]. Alors que Pinol et al. [72] ont évalué la norme de codage vidéo HEVC pour le streaming vidéo dans VANET. Plusieurs facteurs d'encodage ont été étudiés. Hormis l'encodeur vidéo plusieurs facteurs ont

également étaient évalués. Les auteurs de [67] fournissent une évaluation du réseau en analysant la qualité de service lors d'une transmission IPTV dans les VANET. Différents scénarios d'environnement véhiculaire ont été étudiés, ils diffèrent par le nombre ou la vitesse des véhicules. Les auteurs de [104] ont examiné l'impact du protocole de routage sur la transmission vidéo dans les réseaux véhiculaires. Alors que dans [6], une comparaison visuelle de la qualité des utilisateurs de Skype (logiciel de communication peer to peer de Microsoft) est effectuée dans un environnement DSRC simplifié. Une évaluation du mécanisme d'allocation de bande passante est également établie. Afin d'améliorer la transmission vidéo dans les VANETs, plusieurs solutions ont été proposées sur différents aspects de la chaîne de transmission. Gupta et al. [36] ont présenté une étude complète de certaines des améliorations apportées aux protocoles MAC pour les applications de sécurité dans VANET. Alors que l'enquête [43] donne un aperçu détaillé des stratégies de conception inter-couches (Cross-layer) et des défis qui leur sont associés dans les réseaux VANET. L'enquête explore les différents schémas transversaux à travers les différentes couches du modèle de l'interconnexion des systèmes ouverts (modèle OSI). Xie et al [99] ont proposé un mécanisme de récupération d'erreur pour la diffusion vidéo en temps réel dans VANET. En effet, la solution proposée transmet des trames I utilisant le protocole de contrôle de transmission (TCP) et les autres types de trames en utilisant le protocole UDP (User Datagram Protocol). Quant à Zaidi et al. [101], ils ont proposé un mécanisme amélioré de correction des erreurs par sous-paquet adaptatif pour le streaming vidéo dans les VANET. Le mécanisme est basé sur la charge du réseau et sur l'importance des types de trames vidéo. En effet, le mécanisme offre une protection élevée, basée sur la correction d'erreur directe (FEC), pour les trames vidéo les plus importantes. Dans [102], les mêmes auteurs proposent une amélioration du protocole UDP pour le streaming vidéo dans VANET. Le mécanisme repose sur une correction directe des erreurs de paquet et une protection inégale entre les types de trame vidéo. Dans [103] le protocole proposé est hybride. Il permet de récupérer des erreurs de transmission uniformes et de récupérer les erreurs de rafale dues principalement à la congestion du réseau via une technique de retransmission. Encore une fois, une distinction entre les images est utilisée et la charge du réseau est considérée comme déterminée par la longueur de la file d'attente du véhicule. Mammeri et al. [62] ont proposé une modification du protocole de transport en temps réel (RTP) pour faciliter la transmission de la vidéo encodée en H.264. L'implémentation de la transmission vidéo dans VANET a également été réalisée. Quant à Rezende et al. [77] ils ont utilisé le codage de réseau et le codage d'effacement pour le streaming vidéo dans les VANET. En outre, le problème de latence pour une transmission à faible délai n'est suffisamment pris en considération dans les applications de transmission vidéo dans les VANETs. En effet, la plupart des encodeurs vidéo utilisés ou les techniques proposées nécessitent une latence assez significative dédiée aux applications insensibles au retard. Chen et al. [15] ont établi un modèle de distorsion du taux de retard dans un système de communication vidéo sans fil. À cette fin, ils ont utilisé le mode IP du H.264. Le modèle proposé permet d'établir une relation fonctionnelle entre le temps de codage vidéo, le débit dans le codeur vidéo et le niveau de distorsion. Bien que Vinel et al. [93] ont proposé un modèle de bout en bout pour le dépassement des applications d'assistance à la manœuvre. Le modèle est basé sur l'adaptation en temps réel du codec à la variation de canal dans un schéma IEEE 802.11p.

1.6 Conclusion

L'objectif de ce premier chapitre était de situer le contexte de nos travaux de thèse qui visent à optimiser les transmissions vidéo sur les réseaux ad-hoc véhiculaires. Nous nous intéressons au cas de la transmission sans fil qui s'appuie sur un système basé sur une connexion WIFI suivant

la norme IEEE 802.11p.

Nous avons d'abord rappelé le contexte de l'étude avec le développement des normes et des systèmes de transport intelligents. Nous avons également rappelé les exigences et les applications des transmissions vidéo sur les réseaux ad-hoc véhiculaires. Nous avons par la suite fait un focus sur l'encodage et la transmission d'un flux vidéo avec les dernières normes d'encodage vidéo. Les bases du codage et de la transmission d'un flux vidéo numérique ont été abordées et également les principales caractéristiques du nouveau standard de compression vidéo H.265/HEVC que nous avons considéré dans ce travail.

Par la suite, nous avons décrit succinctement un mécanisme d'amélioration de la transmission dit cross-layer qui a été exploité dans ce travail de thèse et sera abordé dans les trois derniers chapitres. Nous avons également donné un aperçu des différents travaux existants dans la littérature en lien avec ce travail.

La mise en place d'un réseau véhiculaire réel étant une chose ardue, nous avons évalué les solutions proposées par simulation grâce à l'implémentation d'un Framework dédié. Dans le chapitre suivant, nous allons présenter les différents outils de simulation utilisés ainsi que d'apporter une évaluation de la transmission vidéo dans un environnement réaliste.

Chapitre 2

Evaluation de la transmission vidéo dans les réseaux VANETs

2.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, après avoir rappelé le contexte de l'étude, nous avons décrit les techniques d'encodage et de transmission d'un flux vidéo. Nous avons également décrit succinctement un mécanisme d'amélioration de la transmission dit cross-layer. Dans ce chapitre nous proposons un état de l'art des outils de simulation d'un réseau ad-hoc véhiculaire ainsi que la modélisation du canal véhiculaire. Nous décrivons également les métriques utilisées dans l'évaluation de la qualité de la vidéo ainsi que la qualité de la transmission sur les réseaux sans fil.

Nous présentons ensuite une évaluation de la transmission vidéo dans un scénario VANET. Ainsi, nous avons étudié l'effet de certains paramètres d'encodage vidéo sur la transmission et sur la vidéo à la réception, et comparons les performances obtenues dans les différentes configurations.

2.2 Plateforme de simulation VANET

2.2.1 Environnement de simulation

Afin d'évaluer les performances des solutions proposées, nous avons mis en œuvre une simulation réaliste d'une transmission vidéo dans un environnement véhiculaire. Notre Framework illustré à la Figure 2.1 page suivante est composé de trois blocs principaux, à savoir un simulateur de trafic automobile, un simulateur de réseau et un encodeur/décodeur vidéo.

SUMO (Simulation of Urban Mobility)

SUMO est un logiciel en libre accès (open source) [52] de simulation de trafic routiers, implémenté en C++ permettant de modéliser les véhicules, les transports en communs et même les piétons et offre une vue microscopique du trafic. A partir de cartes réelles SUMO permet la simulation de trafic routier réaliste avec la possibilité de varier : le nombre de véhicules, la vitesse, le trajet, etc.

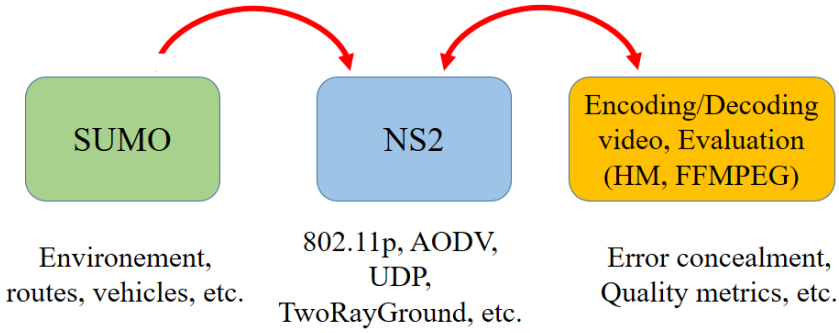


FIGURE 2.1 – Représentation de notre modélisation VANET

SUMO est utilisé dans plusieurs domaines, dont celui des applications V2X. En effet, il peut produire des traces de véhicules réalistes, et permet ainsi d'interagir avec un simulateur de réseau tel que NS-2, NS-3 Omnet++, etc.

De nombreux générateurs de trafic existent tels que VanetMobiSim, C4R et FreeSim mais comme le démontrent M.Fogue et al. [30] SUMO offre le plus de fonctionnalités pour les applications souhaitées.

Le simulateur réseau NS2

Le simulateur de réseaux NS2 fournit au monde de la recherche un support pour simuler un réseau avec différents protocoles de transport, protocoles de routage, gestions de files d'attente et d'autres applications sur les réseaux filaires et sans-fil.

NS2 a été conçu de sorte que le code offre réutilisabilité et modularité. L'utilisation du simulateur NS2 est simple et flexible [88]. De plus, les résultats des simulations sont reproductibles, ce qui permet de bien décrire des événements apparus pendant la simulation et d'en tirer des conclusions. Cela offre également la possibilité de vérifier très facilement l'influence d'un changement du code sur les résultats. NS2 est un simulateur à événements discret écrit en C++ avec le langage orienté objet Tcl (OTcl) pour configurer les objets. Ces objets sont des nœuds, des liaisons, des agents ou des applications. Les nœuds et les liaisons définissent la topologie du réseau. Les agents représentent les points finaux, tandis que les applications sont des sources de trafic qui envoient et reçoivent les données.

Pour permettre une évaluation de la transmission vidéo avec de tels outils, nous avons également intégré l'outil « Evalvid » dans notre plateforme. EvalVid est un framework pour l'évaluation de la qualité de la transmission vidéo de bout en bout [50]. Le framework a une structure modulaire, permettant d'échanger le système de transmission sous-jacent aussi bien que les codecs. Afin de permettre la transmission des vidéos encodées en HEVC des modifications ont été apportées au niveau de différents modules d'Evalvid. Toutes les interactions avec le réseau se font via des fichiers "traces".

Encodeurs vidéo

En ce qui concerne l'encodage de la vidéo et comme indiqué précédemment, nous avons décidé d'utiliser les deux derniers standards du JVT (Joint Video Team) à savoir le H.264 et le HEVC. Pour se faire nous avons utilisé les deux logiciels, open source, de références respectivement le joint model (JM) et le HEVC test model (HM). Pour nos travaux, nous avons

utilisé la version 19 du JM [45] et plusieurs versions du HM tout au long de la thèse (9.0, 16.9, 16.14 et en particulier la version 16.16) [40]. Ces deux logiciels permettent d'apporter différentes modifications au flux vidéo, tels que la structure du GOP, le pas de quantification QP, le type de la prédiction temporelle, le débit vidéo en sortie, etc.

2.2.2 Paramètres de simulation

De plus, comme décrit précédemment, le standard utilisé est le standard IEEE 802.11p qui comprend une couche MAC utilisant la technique d'accès au support CSMA/CA avec prise en charge de la QoS et une couche PHY fonctionnant dans la bande de fréquences de 5,9 GHz avec modulation OFDM [16]. Nous avons choisi le protocole de routage réactif AODV et qui, grâce à nos propres simulations ou d'après la littérature [104], présente un avantage de performance par rapport à d'autres protocoles de routage. En ce qui concerne le protocole de couche de transport nous avons utilisé de multiples protocoles. Néanmoins pour garantir une latence minimale, nous avons choisi de travailler avec le protocole UDP (User Datagram Protocol) pour les travaux de la partie 1 et 2.

2.2.3 Modélisation du canal véhiculaire

La mobilité dans les VANET fait que les véhicules entrent et sortent rapidement et fréquemment du domaine de transmission. Ainsi, la fonction correcte d'un protocole une fois déployé dans un environnement réel testé peut différer considérablement des résultats de la simulation car il peut arriver que le simulateur soit trop optimiste. Cependant, dans certains cas, la réalité permet à deux nœuds d'échanger des informations qui n'aurai pas été possible dans le simulateur grâce à un modèle de propagation simpliste. De ce fait, un des facteurs déterminant la probabilité de réception des paquets est spécifié par le modèle de propagation des ondes radio supposé. En effet, la sélection d'un modèle de propagation des ondes radio influence la probabilité de recevoir des paquets. La simulation de « tracing » donne une vue détaillée de la propagation des ondes radio. Cependant, le temps d'exécution reste trop important en raison de l'effort de calcul requis. Ainsi, la communauté scientifique a souvent appliqué des modèles simplificateurs pour caractériser la propagation radio. Néanmoins, la littérature différencie les modèles déterministes et probabilistes, qui caractérisent tous deux l'atténuation de la force du signal radio sur la distance. Dans cette section, nous présentons les modèles de propagation d'ondes radio les plus courants qui sont des modèles de propagation servant à prédire la force moyenne du signal pour modèles de propagation émetteur-récepteur et ils peuvent être déterministes ou probabilistes :

Modèles déterministes

Un modèle déterministe permet de calculer l'intensité du signal reçu, en fonction des propriétés réelles de l'environnement entre autres la distance entre l'émetteur T et le récepteur R. Ces modèles vont du simple qui prend compte uniquement de la distance entre les nœuds au très complexe tenant compte de la propagation par trajets multiples dans l'environnement. Ce dernier, peut également être modélisé selon la zone de déploiement.

Modèle d'espace libre Ce modèle est parfois appelé modèle Friis, du nom de son inventeur [31]. Il modélise une seule voie de communication non obstruée. La puissance reçue P_r dépend uniquement de la puissance transmise, du gain d'antenne et de la distance entre l'émetteur et le récepteur. L'idée est que, lorsqu'une onde radio se déplace loin d'une antenne (omnidirectionnelle), la puissance diminue avec le carré de la distance :

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^\alpha L} \tag{2.1}$$

Où :
— P_t est la puissance transmise,
— G_t et G_r sont les gains d'antenne de l'émetteur et du récepteur,
— λ est la longueur d'onde,
— α est l'exposant de perte de chemin,
— L est la perte du système.

Du point de vue de la topologie, ce modèle considère les nœuds comme flottants dans l'espace libre.

Modèle Two-Ray Ground Le modèle à deux rayons (Two-Ray Ground) prend également en compte une réflexion par le sol, compte tenu des propriétés diélectriques de la terre en plus de la ligne de visée directe (LOS) [82]. En conséquence, les nœuds sont positionnés sur un plan. Ce modèle donne des prévisions plus précises à plus longue distance que le modèle de l'espace libre et est donné comme suit :

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r h_t^2 h_r^2}{d^4 L} \tag{2.2}$$

Où ${h_t}^2$ et ${h_t}^2$ sont respectivement les hauteurs (en mètres) des antennes d'émission et de réception

Les limitations de ce système résident dans les transmission courtes distances à cause de l'oscillation provoquée par la combinaison des deux rayons séparés.

Modèles probabilistes

Les modèles probabilistes permettent une modélisation plus réaliste de la propagation des ondes radio. Un modèle probabiliste utilise un modèle déterministe comme paramètre d'entrée afin d'obtenir une portée de transmission moyenne. Pour chaque transmission individuelle, la puissance reçue est alors tirée d'une distribution. Le résultat est une distribution plus diversifiée des réceptions réussies. La distribution de ces effets dépend du modèle probabiliste et de ses paramètres.

Le modèle de Rayleigh Le modèle de propagation Rayleigh modélise la situation lorsqu'il n'y a pas de LOS et que seuls les composants multi-trajets existent. Ce modèle intègre des variations intensives de la puissance du signal reçu, car plusieurs chemins peuvent être combinés de manière constructive ou destructive [73]. L'amplitude, le retard et le déphasage de ces composants dépendent grandement de l'environnement. Ce modèle suppose que l'amplitude du signal reçu r varie aléatoirement selon une distribution de Rayleigh qui est la somme de deux variables aléatoires gaussiennes non corrélées $r(t) = \sqrt{I(t)^2 + Q(t)^2}$ fonction de la densité de probabilité suivante :

$$P(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp(\frac{-r^2}{2\sigma^2}) \tag{2.3}$$

Où σ^2 est la puissance moyenne temporelle du signal reçu (la variance de I (t) et Q (t)).

Le modèle de Nakagami Le modèle Nakagami est très générique, c'est une distribution fréquemment utilisée pour caractériser les statistiques des signaux transmis sur des canaux à évanouissements multiples [65]. La densité de probabilité de la loi de Nakagami-m est donnée par :

$$P_r(x) = \frac{2}{\Gamma(\mathrm{m})}(\frac{m}{\Omega})^m x^{2m-1} \exp(-\frac{mx^2}{\Omega}) \tag{2.4}$$

Où Γ est la fonction Gamma, m est le paramètre d'évanouissement de distribution et Ω est la puissance moyenne d'affaiblissement. Le paramètre m spécifie l'intensité des effets de fondu. La distribution Nakagami comprend d'autres modèles, tels que pour :

— m=1/2 le canal est décrit comme un canal à évanouissement gaussien mono-latéral,
— m= 1 le canal suit la distribution de Rayleigh,
— m tend vers l'infini définit le modèle Free Space, etc.

Dans cette thèse nous avons utilisé les deux modèles : le modèle déterministe TwoRayGround et le modèle probabiliste Nakagami.

2.3 Critères d'évaluation

2.3.1 Séquence vidéo de référence

Le choix des séquences appropriées nous permet d'étudier les différents effets évoqués dans des cas réalistes. En fait, la résolution vidéo est étroitement liée à l'application vidéo ciblée. Par conséquent, l'équipe de collaboration sur le codage vidéo (JCT-VC) a introduit la notion de classe dans le choix des séquences à traiter. En effet, les séquences vidéo de test sont classées en six classes (classe A à classe F) [98]. La classe A est l'ensemble des séquences avec une résolution supérieure à la résolution haute définition 1080p. Les séquences sont utilisées par exemple pour réduire le temps de calcul ou pour évaluer les performances de l'encodage vidéo 4K / 8K. Les résolutions de la séquence de classe A sont 2.560×1.600 pixels. La classe B est utilisée dans l'évaluation des performances de la TVHD 1080p, avec une taille d'image de 1920×1080 pixels. Les classes C et D sont destinées à évaluer les performances des applications vidéo mobiles. Les résolutions d'image correspondantes sont 832×480 pixels pour la classe C et 416×240 pixels pour la classe D. La classe E est composée de séquences de test d'une taille d'image de 1280×720 pixels. La classe E est dédiée à l'évaluation des performances de codage pour les applications à faible latence telles que la vidéo surveillance ou les communications interactives visuelles. Les séquences de classe F sont utilisées dans l'évaluation des performances du contenu capturé par des moyens autres que la caméra, sous forme de textes et de graphiques contenus dans les écrans vidéo.

En outre, la Recommandation UIT-T P.910 indique que lors de la sélection des séquences de test, il peut être utile de comparer les informations spatiales relatives et les informations temporelles trouvées dans les différentes séquences disponibles [41]. Généralement, la difficulté de compression est directement liée à l'information spatiale (SI) et à l'information temporelle (TI) d'une séquence. Le SI est une mesure qui indique généralement la quantité de détails spatiaux d'une image. Il est généralement plus élevé pour les scènes plus complexes sur le plan spatial. Alors que l'information perceptuelle temporelle (TI) est une mesure qui indique généralement la quantité de changements temporels d'une séquence vidéo. Il est généralement plus élevé pour les séquences avec mouvements élevés. Si un petit nombre de séquences a été utilisé dans un test donné, il peut être important de choisir des séquences couvrant une grande partie du plan d'information spatio-temporel. Suite à cette recommandation, nous avons décidé d'étudier l'effet

de la distribution des informations spatio-temporelle des séquences dans notre situation. Nous avons pris en compte la classe que nous avons considéré la plus adaptée pour une transmission VANET qui est la "classe C". De plus, la résolution proposée par la "classe C" est destinée aux applications mobiles tout en respectant la résolution minimale requise pour la surveillance (pas moins de 640×480).

2.3.2 Métriques d'évaluation

Au départ du déploiement des réseaux informatiques, aucunes exigences spécifiques en termes d'accès n'étaient nécessaires et aucune méthode de différenciation des services n'existait. La seule solution pour assurer un bon fonctionnement de toutes les applications était de surdimensionner le réseau, en cas de besoin. Avec le développement des réseaux, la Qualité de Service (QoS) est venue répondre aux exigences de différentes applications telles que : la visioconférence, le transfert de fichiers, l'accès au Web et de la messagerie instantanée. En effet, contrairement aux flux initiaux que devaient gérer les réseaux, les nouvelles applications nécessitent des garanties de délai, de débit ou encore de gigue afin d'assurer un bon fonctionnement du réseau.

Nous allons décrire, dans cette partie, les paramètres permettant l'évaluation de la QoS, au niveau application et réseau. Nous introduisons par la suite les critères d'évaluation de la Qualité d'Expérience (QoE) liée à la QoS.

Critère d'évaluation de qualité de service

Les principaux paramètres influant sur la perception de l'utilisateur selon L'UIT-T (Union internationale des télécommunications) sont les suivants :

— La perte d'informations qui est due à deux facteurs :

1. L'encodage de l'information à la source.
2. La transmission (essentiellement les pertes de bits ou de paquets).

— Le délai de transfert des paquets (le délai de bout en bout) qui est dû aux :

1. Délais de propagation et de transmission.
2. Délais d'attente dans les files.
3. Délais d'encodage et de décodage dans le cas d'une application temps réel.

— La gigue où le Jitter, qui est la variation du délai, représente la différence liée au moment d'arrivée des paquets d'informations.

Ces paramètres de performances caractérisent la qualité perçue par l'utilisateur final pour les différentes applications. Nous pouvons classer généralement ces différentes applications, en trois catégories de médias : audio, vidéo et données.

Critère d'évaluation de la qualité visuelle

En ce qui concerne l'évaluation de la qualité vidéo visuelle, il est important de faire la distinction entre les mesures objectives et les mesures subjectives. En effet, les approches objectives sont basées sur des techniques mathématiques qui génèrent des mesures quantitatives de la qualité d'un service proposé à un utilisateur. Les approches subjectives, quant à elles, sont généralement basées sur des tests d'utilisateurs permettant d'évaluer différentes configurations d'un service.

Comme dans la plupart des travaux de recherche en codage vidéo, nous avons choisi d'employer une approche objective plutôt qu'une approche subjective trop exigeante en termes de conditions d'expérimentations. Nous présentons dans ce paragraphe les outils choisis pour mesurer la qualité visuelle de la vidéo reconstruite.

Quelle que soit l'efficacité de la technique de compression, il existera toujours des distorsions dans la vidéo reconstruite. La qualité peut être évaluée par de nombreuses méthodes objectives existantes.

Pour ce qui est des travaux de cette thèse, nous avons retenu deux méthodes :

— Le rapport signal à bruit ou Peak Signal to Noise Ratio (PSNR).

— La similarité structurelle ou Structural SIMilarity (SSIM).

Peak Signal to Noise Ratio (PSNR) L'erreur quadratique moyenne (EQM) permet d'évaluer le rapport signal à bruit de l'image reconstruite, noté PSNR (Peak Signal to Noise Ratio) et est exprimé en décibel (dB). L'expression du PSNR pour un calcul image à image est donnée par l'équation suivante [66], Pour la k^{eme} image, $k = 0, 1, \cdots, K-1$, est défini comme suit, fonction de l'EQM :

$$PSNR_k = 10 \times \log_{10}\left(\frac{d^2}{EQM_k}\right) \tag{2.5}$$

Les images étant généralement codées sur 8 bits, la valeur de d est de 255. L'erreur quadratique moyenne (EQM) de deux images I_r et I_o de taille $M \times N$ est définie comme suit :

$$EQM_k = \frac{1}{M \times N} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} (I_o(m,n,k) - I_r(m,n,k))^2 \tag{2.6}$$

Pour notre part, nous calculons également le PSNR vidéo moyen entre la vidéo reçue reconstruite et la vidéo originale. Comme démontré par [66] pour les cas d'erreur de canal ou de perte de paquets, le PSNR moyen doit être calculé comme suit :

$$PSNR_{avg} = 10 \times \log_{10}\left(\frac{d^2}{\mu_{EQM}}\right) \tag{2.7}$$

Avec μ_{MSE} est la moyenne du l'EQM des images. Il est à noter que l'évaluation du PSNR ne reflète pas tout à fait la dégradation des images comme pourrait le ressentir l'œil humain. Néanmoins, plus le PSNR est élevé, meilleure est la qualité de l'image décompressée ou reconstruite pour le cas d'une transmission.

Structural SIMilarity (SSIM) Les mesures SSIM utilisent la distorsion structurelle dans la vidéo comme une estimation de la distorsion visuelle perçue. Le SSIM est basé sur l'hypothèse que le système visuel humain (SVH) est hautement adapté pour extraire des informations structurelles du champ de visualisation [96]. Ainsi, le niveau de dégradation perçue est proportionnel à la perte structurelle perçue au lieu des erreurs perçues. La valeur de SSIM est comprise entre 0 et 1. Plus la valeur de SSIM proche de 1, plus les images se ressemblent. La valeur du SSIM est donnée par l'équation suivante :

$$\mathrm{SSIM}(x,y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1) + (2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)} \tag{2.8}$$

Avec :

— μ_x et μ_y représente respectivement la moyenne de l'image original et de l'image reconstruite.

— σ_x, σ_y et σ_{xy} représente respectivement l'écart type de l'image original, celui de l'image reconstruite et la covariance des deux images.

— C_1 et C_2 sont deux constantes.

2.4 Evaluation de la transmission vidéo dans les réseaux VANETs

Plusieurs travaux de recherche ont étudié l'influence de différents aspects de l'environnement véhiculaire sur la transmission de l'information. Nous pouvons lister : la densité de nœuds, la topologie véhiculaire, la mobilité des véhicules, le milieu de propagation, etc. Dans cette thèse, nous avons orienté notre étude sur l'influence de l'information à la source sur la transmission. En effet, nous avons établi une étude sur l'effet de différents paramètres de codage vidéo des deux derniers codecs, à savoir le H265 / HEVC et le H264 / AVC, dans le cas d'un réseau VANET urbain réaliste. L'étude adopté permet de mieux choisir certains paramètres pertinents des codecs vidéo afin d'améliorer la transmission vidéo via un réseau véhiculaire. Le but étant d'étudier :

— Les effets de différents paramètres de codage vidéo de ces deux encodeurs sur la qualité de la vidéo reçue via un réseau VANET urbain réaliste.
— Les effets du contenu vidéo, généralement mesurés par les paramètres d'information temporelle (TI) et d'information spatiale (SI), dans le VANET.

Cette étude nous a montré que les paramètres de codage, entre autres le paramètre de quantification (QP) et le groupe d'images (GOP), ainsi que le contenu de la vidéo ont une grande influence sur la transmission et donc sur la qualité visuelle à la réception.

2.4.1 Paramètres d'encodage vidéo

Afin d'étudier l'influence de la taille de la séquence vidéo, différentes séquences ont été utilisées à savoir : Parkscence, Race Horses, Blowing Bubbles et Kristen And Sara respectivement pour les classes B, C, D et E. Ces séquences ont été encodées par les deux encodeurs H.264 et HEVC. Nous considérons le profil à faible retard pour HEVC et le profil "high" pour H.264. Les sept séquences ont été codées comme décrit par Bjontegaard [9] avec des qualités différentes, indiquées par trois valeurs de paramètres de quantification (QP) différentes (27, 32 et 37). Le cas d'un QP 22 n'étant pas pris en compte pour une application véhiculaire. La fréquence d'images utilisée est de 30 images par seconde pour chaque séquence. De plus, nous évaluons également l'influence de la taille du GOP dans l'encodage de la vidéo. Ainsi, nous adoptons quatre différentes tailles de GOP : 8, 12, 16 et 32. Pour éliminer la dépendance entre deux GOP, les I-Frames sont encodées en Rafraîchissement Instantané (IDR).

La Figure 2.2 montre la qualité de la vidéo représentée par le PSNR à la réception pour les quatre séquences codées avec H265 / HEVC. Les deux séquences, Figure 2.2 (C et D), de basse résolution sont transmises sans erreur. La qualité change en fonction du débit en raison des variations des valeurs du QP. Chaque courbe de séquence représente une structure de codage GOP différente. Dans les deux séquences mentionnées précédemment, seul le codage vidéo introduit une erreur. Cela n'est pas le cas pour les séquences à haute résolution, Figure 2.2 (A et B), où il y a une dégradation due à la transmission et à la limitation de la bande passante. Une dégradation du PSNR est observée pour un certain débit cible. Un PSNR inférieur à 20 dB est considéré comme de très mauvaise qualité et ne peut être proposé pour des applications vidéo V2V viables.

La Figure 2.3 représente l'évolution de la métrique PSNR du côté récepteur pour les quatre séquences codées avec H.264. Les mêmes constatations établies pour la Figure 2.2 peuvent être faites sur ces résultats, mais la dégradation de la vidéo encodée en H.264 est encore plus

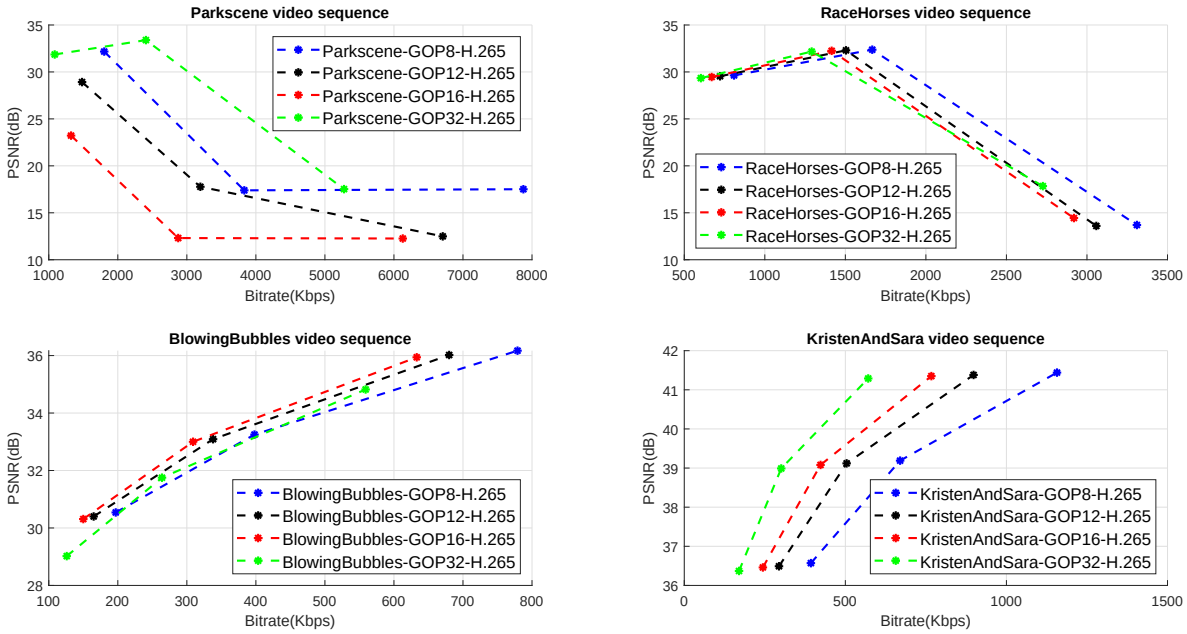


FIGURE 2.2 – Rapport débit distorsion pour la transmission de différentes séquences de test encodées en HEVC : a) Parkscene sequence ; b) Racehorses ; c) Blowingbubbles, et d) KristenAndSara.

importante. Dans le cas du H.264, nous vérifions qu'il est impossible de décoder la vidéo en présence de fortes pertes de paquets pour un débit binaire élevé, Figure 2.3 (A et B).

Dans notre étude, l'aspect QoS a également été étudié, la Figure 2.4 représente le pourcentage de bonne réception (PDR) dans le cas de la transmission de la séquence Racehorses encodée avec HEVC, exemple observé sur toutes nos transmissions avec différentes proportions de bonne réception de paquets. Nous pouvons également noter l'augmentation du pourcentage de paquets reçus pour une taille de GOP plus grande.

Impact de l'encodeur

Nous comparons d'abord les performances des deux encodeurs. En effet, les différentes séquences ont été encodées au moyen de H.264 puis H.265. Nous vérifions que H.265 apporte un gain moyen de 56% en débit en comparaison au H.264 pour la même qualité vidéo. Comme représenté sur les Figures 2.2 et 2.3, ce gain en débit binaire affecte la qualité de la transmission et la qualité vidéo après transmission. En effet, la réduction de l'information à transmettre a permis d'améliorer le pourcentage de paquets correctement délivrés et de rehausser la qualité visuelle exprimée par PSNR d'environ 5 dB en moyenne à la réception. De plus, les résultats de la simulation sont conformes à ceux présentés dans [69].

Influence de la séquence

Nos résultats montrent que la transmission de vidéos avec des résolutions inférieures aux vidéos de "classe B" dans les VANET est possible pour les différentes qualités vidéo et pour les

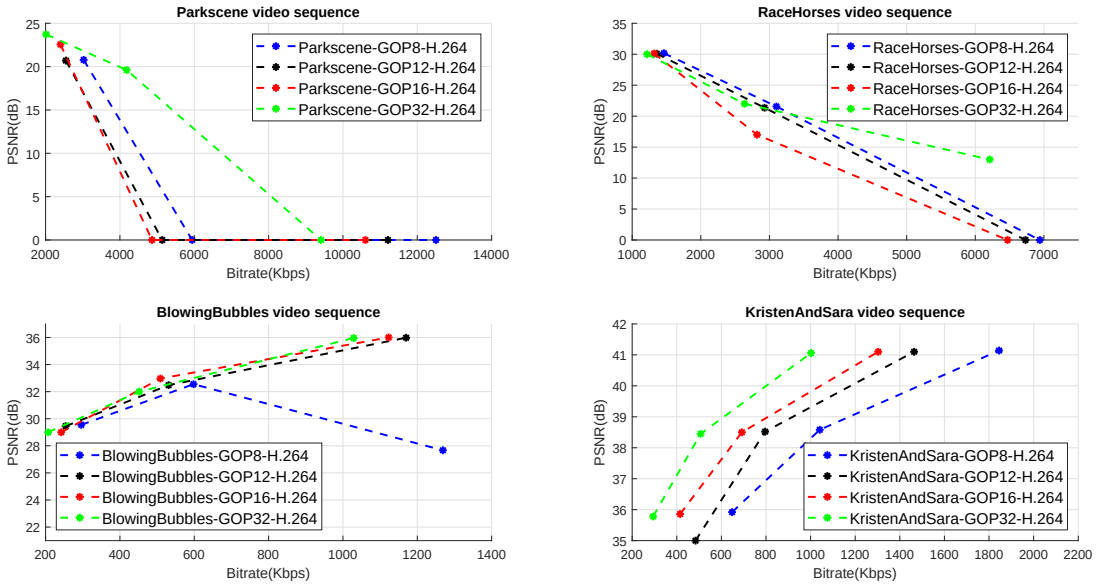


FIGURE 2.3 – Rapport débit distorsion pour la transmission de différentes séquences de test encodées en H.264 : a) Parkscene sequence ; b) Racehorses ; c) Blowingbubbles, et d) KristenAndSara.

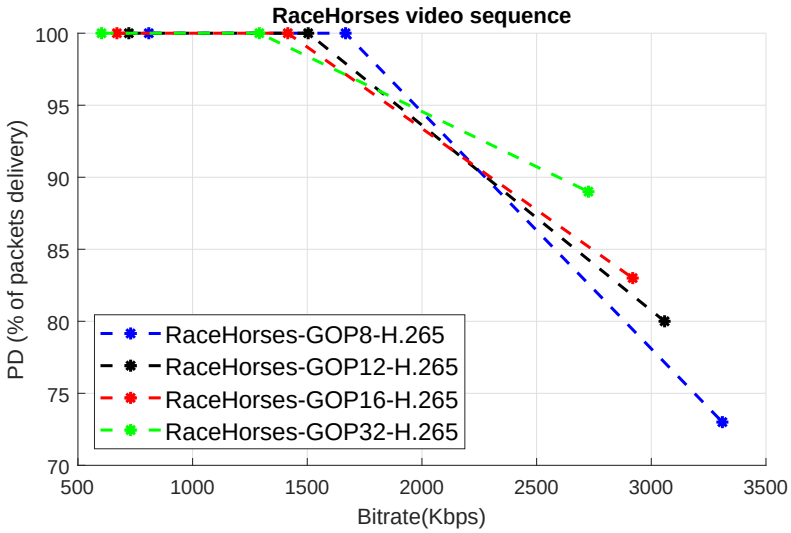


FIGURE 2.4 – Le pourcentage de paquets correctement livrés pour la séquence de Racehorses encodée avec H.265

différents encodages. Le cas de la vidéo HD est plus particulier où l'on constate que seules les vidéos encodées au H.265 et de qualité inférieure (QP = 37) peuvent être transmises dans de bonnes conditions et présentent une qualité visuelle jugée bonne. Alors que pour la séquence Racehorse de la "classe C" encodée en H.264, seule la qualité inférieure permet une bonne réception de la vidéo. La séquence de classe E, même supérieure à la séquence de classe D, est transmise sans erreur pour les différents niveaux de qualité, tandis que la séquence D présente un pourcentage de perte de paquets de 35%. Les faibles SI et TI de la classe E expliquent cela. Alors que la séquence de classe D a un SI fort et un TI fort.

Effets des paramètres de codage :

Pour chaque séquence, une amélioration de la qualité est observée en fonction du débit jusqu'à atteindre un seuil de perte de paquets. Le seuil varie en fonction de la distribution et de la quantité du flux binaire, une fois le seuil atteint, il y a dégradation de la qualité visuelle ou incapacité à décoder la vidéo reçue. Nous fixons la qualité visuelle en fonction de 3 valeurs de QP, nous voyons que plus le débit augmente, plus la qualité du PSNR s'améliore. La congestion du réseau provoque une perte de paquets plus ou moins importante qui affecte la qualité visuelle à la réception. Pour les vidéos montrant une grande quantité de flux binaires, on peut noter que la dégradation du réseau réduit la qualité visuelle ou rend même le décodage impossible. Sur la base de cette observation, il est nécessaire de concilier la qualité visuelle du codage avec la bande passante du canal véhiculaire. La taille de GOP de la vidéo joue également un rôle important dans le codage de séquence. Dans nos simulations, nous avons pris le cas de 4 tailles de GOP différentes. De toute évidence, plus le GOP est petit, meilleure est la qualité de la vidéo en raison de l'espacement réduit entre les images IDR et du nombre de codages d'image dans le codage interne dans le flux binaire, mais cela implique également un débit binaire plus important. Les résultats montrent deux cas possibles : dans un réseau faiblement congestionné, même si le pourcentage de bonne réception des paquets est moins bon lorsque le GOP est plus petit. Le fait que les erreurs se propagent dans un plus petit nombre d'images garantit une meilleure qualité visuelle par rapport aux grandes quantités de GOP. Néanmoins, lorsque le réseau est fortement encombré, nous constatons qu'un GOP plus important nous donne une meilleure qualité visuelle. Là encore, nous pensons qu'une structure adéquate nous permet d'obtenir la meilleure qualité visuelle possible.

2.4.2 Caractéristiques intrinsèques des vidéos

Les applications vidéo disponibles dans les VANET sont relativement liées aux caractéristiques intrinsèques des vidéos et de leurs SI et TI. En effet, plus les informations spatiales et temporelles sont importantes plus la quantité d'informations est importante et plus la transmission est difficile. En effet, pour une même qualité plus une séquence présente des valeurs élevées SI et TI, moins elle est compressée.

Pour cette partie, nous avons décidé d'utiliser quatre séquences situées sur quatre plans SI TI différents d'une même classe, à savoir la classe C :

— Race Horses
— Partyscene
— Johnny mise à l'échelle de la résolution de la classe C avec une résolution à 832x480
— Kimono1 mise à l'échelle de la résolution de la classe C avec une résolution à 832x480.

La Figure 2.5, montre que les quarte séquences sont sur quatre zones distinctes du plan TI/SI. On constate que Johnny possède un TI faible et un SI relativement faible, le Partyscene a un TI faible et un SI élevé, Racehores a un SI élevé et un TI élevé et Kimono1 car il a un TI élevé et un

SI faible.

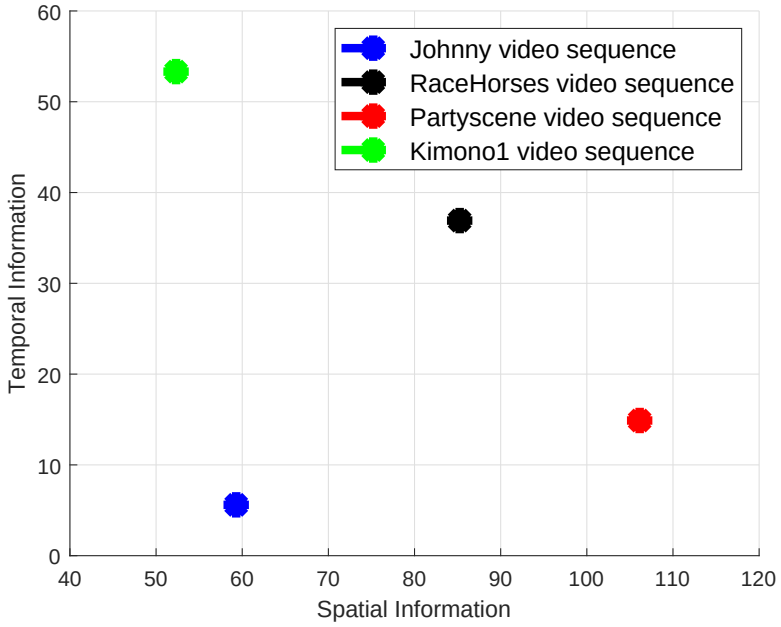


FIGURE 2.5 – Représentation des SI et TI des séquences de test utilisées.

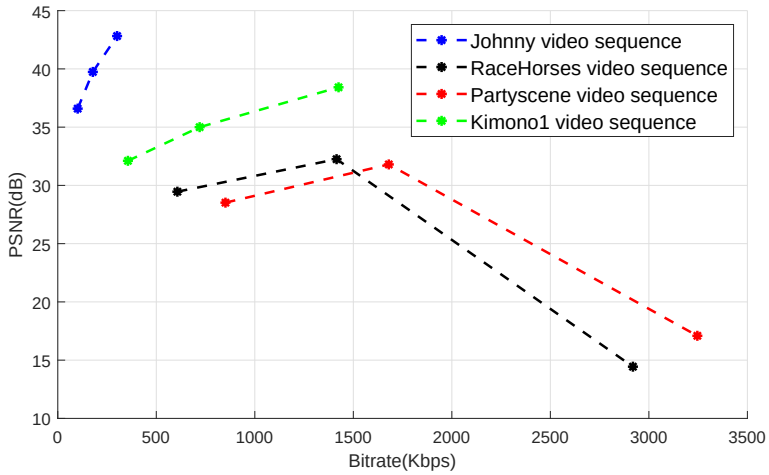


FIGURE 2.6 – Rapport débit distorsion pour les différentes séquences de classe C.

La Figure 2.6 montre la prédominance de l'effet spatial expliqué par le fait que le SI est plus relatif à l'image codée en Intra (image I) et le TI au codage inter-image (image P ou B). Si le SI est élevé, cela implique que dans la même image, il y a plus de petits détails et, par conséquent, les images de type I compressées n'apportent pas des taux de compression élevés. D'autre part,

les TI élevées indiquent des mouvements significatifs dans la séquence vidéo, mais cela ne nous empêche pas d'obtenir des taux de compression P et B élevés.

2.5 Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, nous avons présenté les outils utilisés dans la modélisation d'une transmission vidéo dans un environnement véhiculaire ainsi que les métriques d'évaluation adoptées. Nous avons également abordé l'évaluation d'une transmission vidéo dans les réseaux VANET. Ainsi, un choix judicieux des paramètres de codage vidéo a un impact réel sur la qualité de la transmission vidéo via un réseau véhiculaire. En effet, les VANET sont des réseaux hostiles ayant une bande passante relativement limitée et relativement variable. Notre étude comparative montre le gain qu'apporte la dernière norme de compression HEVC, du point de vue des paramètres de codage adoptés, en comparaison à ses prédécesseurs dans un contexte VANET spécifique. Ce travail montre également l'impact de la séquence vidéo et de son contenu en termes de résolution, d'informations spatiales et d'informations temporelles sur la qualité des données reçues. A cette fin, l'amélioration d'une transmission vidéo à travers des réseaux véhiculaires peut commencer par un choix approprié du paramètre de quantification QP et de la taille du groupe d'images GOP par rapport aux spécificités de la séquence vidéo à transmettre. Les travaux futurs consisteront à mettre en œuvre une méthode adaptative pour modifier dynamiquement les paramètres de codage en fonction des conditions du réseau avec une fréquence de décision basée sur la taille du GOP.

Deuxième partie

Amélioration de la transmission vidéo avec un système cross-layer basé sur la couche MAC

Chapitre 3

Solutions inter-couche pour le streaming à faible latence sur les réseaux VANET

3.1 Introduction

On se propose d'aborder dans ce chapitre, l'amélioration des performances d'un streaming à faible latence sur les réseaux VANET. Cette amélioration est apportée par un mécanisme inter-couches d'acheminement des trames au niveau de la couche MAC dédiés à la norme IEEE 802.11p. Les algorithmes tirent parti des nouvelles structures de prédiction temporelles introduites dans HEVC. Les mécanismes proposés prennent en compte à la fois l'importance de chaque trame dans une vidéo et l'état du canal déterminé par la longueur de la file d'attente de la couche MAC. Ainsi, les trames correspondantes à la vidéo transmise sont affectés à la file d'attente alternative la plus appropriée de la couche MAC, en tenant compte de la structure de prédiction temporelle de la vidéo, de l'importance de chaque trame et de l'état de la charge de trafic réseau instantané. Le mécanisme multi-couches proposé a été évalué par simulation dans des environnements de véhicules réalistes.

Dans un premier temps nous rappelons les notions de gestion de la couche MAC du standard IEEE 802.11p ainsi qu'une vue d'ensemble des modes d'encodage du HEVC. Nous présentons par la suite deux solutions : l'une basée sur le type d'image et l'autre, plus élaborée, basée sur l'importance de chaque image dans la structure temporelle d'un flux HEVC. Une discussion des résultats obtenus est réalisée au fur et à mesure.

3.2 État de l'art

3.2.1 Gestion de la couche MAC du standard 802.11p

Un mécanisme qui fournit un certain niveau de qualité de service dans les réseaux sans fil est généralement appelé mécanisme de prise en charge de la qualité de service. L'approvisionnement QoS fait référence à la capacité d'un réseau à assurer la livraison des données sur ce dernier et à satisfaire certaines exigences de performances pour différentes classes de trafic.

L'une des solutions serait le sur-approvisionnement en bande passante, solution largement utilisée pour résoudre les problèmes de qualité de service dans les applications filaires. Cependant, comme expliqué dans la première partie du manuscrit, le spectre dédié au 802.11p est assez étroit. De plus, les dégradations physiques du canal telles que les évanouissements et les interférences, la réduction extrêmement linéaire de la puissance du signal et les problèmes de terminaux cachés rendent la prise en charge de la qualité de service beaucoup plus difficile. De plus, pour prendre en charge plusieurs utilisateurs simultanément, les ressources WLAN sont généralement accessibles de manière distribuée et basée sur la contention, compte tenu de la nature de diffusion des canaux sans fil. Ces caractéristiques rendent donc la gestion efficace et efficiente des ressources dans les réseaux locaux sans fil cruciale et difficile. Un schéma de gestion des ressources correctement conçu est la clé pour allouer efficacement les ressources radio et garantir la qualité de service.

Ainsi, la gestion des ressources a suscité un intérêt et des efforts de recherche importants dans les milieux académiques et industriels. La question clé est de savoir comment utiliser les ressources sans fil limitées de manière efficace et équitable. La gestion des ressources avec des contraintes de qualité de service soulève deux aspects. L'un est le contrôle d'admission des appels, qui détermine s'il est possible de répondre aux demandes d'un ensemble de clients. L'autre consiste à trouver un moyen optimal de partager les ressources entre plusieurs stations concurrentes, afin de répondre aux demandes de tous les clients. Dans un système distribué, ce partage est réalisé par les protocoles de contrôle d'accès au support (MAC) qui coordonnent les utilisateurs pour utiliser un canal de communication commun dans un réseau. Le protocole MAC est implémenté à chaque station sans fil et contrôle l'accès au canal au niveau de la couche de liaison. Dans le but de partager équitablement les ressources sans fil communes et d'éviter la congestion du réseau, deux cas de Figure possibles :

— chaque station décide à quel moment transmettre de manière distribuée.
— chaque station est autorisée à transmettre par un contrôleur / programmateur central [100].

La gestion des ressources par MAC peut prendre différentes approches. Dans ce qui suit, nous présentons et comparons brièvement les trois principales approches pour les réseaux sans fil.

1. Allocation centralisée des ressources

   Pour garantir la qualité de service des applications, les ressources sans fil peuvent être entièrement ou statistiquement réservées avant qu'un nouvel appel soit admis sur un réseau. Dans les systèmes cellulaires, les ressources sans fil dans les domaines temps / fréquence / code peuvent être canalisées. Chaque appel admis est assigné à un canal dédié pour plusieurs utilisateurs :
   — plusieurs intervalles de temps : c'est l'accès multiple par répartition dans le temps (TDMA),
   — des bandes de fréquences (sous-porteuses) différentes : c'est l'accès multiple par répartition en fréquence (FDMA),
   — des codes différents : c'est l'accès multiple par répartition en code (CDMA).

   Dans [46] les stratégies d'allocation centralisée des ressources utilisées dans les systèmes de troisième génération (3G) sont répertoriées.

2. Réservation de ressources distribuées

   L'allocation centralisée des ressources peut présenter une vulnérabilité liée à une surcharge importante et à une complexité de calcul élevée. Pour les flux avec trafic multimédia, l'allocation centralisée des ressources devient encore plus coûteuse et difficile. Ainsi, la réservation distribuée a été proposée et adoptée dans certaines normes pour les

réseaux locaux, où chaque station sans fil envoie des demandes de réservation de canal, et les autres stations concurrentes n'accéderont pas au canal réservé avec succès. Toutefois, pour l'approche de réservation distribuée, il n'est pas garanti que la réservation réussisse toujours lorsqu'un réseau est encombré.

3. Différenciation de service

   Dans les deux cas précédents, l'allocation ou la réservation de ressources centralisée ou distribuée, le nombre de ressources à allouer / à réserver pour un flux à débit variable est un problème difficile. Une sur-réservation peut entraîner une faible utilisation des ressources tandis qu'une sous-réservation peut entraîner des performances insatisfaisantes.

   Pour un trafic en rafales, il est préférable d'accéder au canal en utilisant un mécanisme de partage équitable. Les normes IEEE 802.11 définissent un ensemble de spécifications MAC et de couche physique (PHY) pour l'implémentation des WLAN, et la fonction de coordination distribuée (DCF) du 802.11 a été largement adoptée. Pour prendre en charge des applications hétérogènes avec différentes exigences de qualité de service, le format DCF amélioré (EDCA) a été proposé et adopté préalablement dans la norme IEEE 802.11e avant d'être exploité dans le standard IEEE 802.11p, où les paramètres système tels que l'espace inter-trame (IFS) et l'intervalle d'interruption peuvent être ajustés pour la différenciation de service [63]. Néanmoins, sans réservation de ressources, le conflit de priorité utilisant EDCA ne peut pas assurer un approvisionnement strict en QoS pour les services multimédias.

Mécanismes d'accès au médium

Le contenu de la norme IEEE 802.11 comprend principalement la spécification de la couche physique et de la sous-couche MAC. La sous-couche MAC de base 802.11 définit deux mécanismes d'accès aux canaux : la fonction de coordination distribuée (DCF) et la fonction de coordination ponctuelle (PCF). La fonction de coordination hybride (HCF) est définie dans la norme 802.11e. L'architecture MAC peut être illustrée à la Figure 3.1, où les fonctionnalités de PCF et HCF sont fournies par les services de DCF.

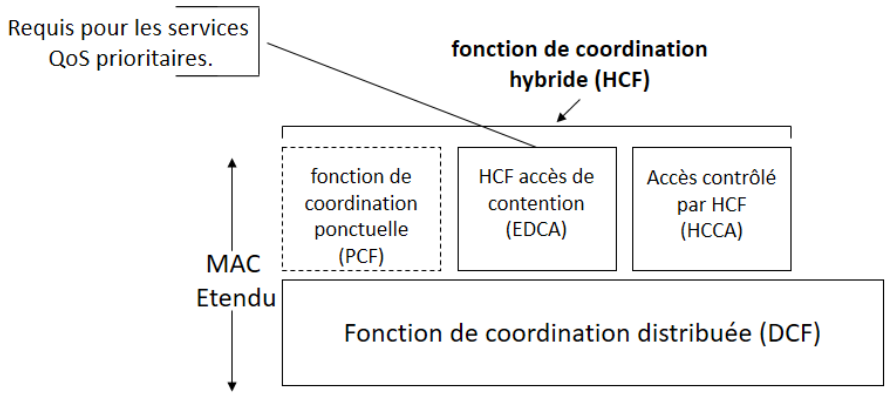


Figure 3.1 – Architecture MAC définie dans IEEE 802.11e

Comme discuté dans la partie 1, les applications multimédias telles que la vidéo et l'audio ont des exigences de qualité de service telles que l'exploitation de la bande passante, le délai, la gigue et la perte de paquets qui diffèrent du service de données. De plus, l'amendement 802.11p spécifie un ensemble de modifications apportées à la couche MAC pour améliorer la QoS.

Une fonction de coordination, appelée fonction de coordination hybride (HCF), a été ajoutée à la norme 802.11e pour améliorer les protocoles MAC de DCF et PCF. HCF est similaire aux mécanismes spécifiés dans l'ancien MAC 802.11 qui a défini les schémas d'accès aux canaux sans contention et réservés sans contention, respectivement : accès aux canaux distribués améliorés (EDCA) et accès aux canaux contrôlés par HCF (HCCA). Afin de prendre en charge l'approvisionnement en QoS dans les réseaux WLAN 802.11, HCF introduit un certain nombre de mécanismes orientés QoS et de sous-types de trames.

Quatre catégories d'accès (Access Category, ou AC) au trafic sont classées par ordre de priorité, à savoir la voix, la vidéo, le meilleur effort et l'arrière-plan. Le principe fondamental de la qualité de service dans EDCA est de donner au trafic multimédia une priorité élevée et le trafic de données du meilleur effort une faible priorité dans l'accès au canal. Par exemple, les e-mails sont attribués avec une faible priorité (meilleur effort) alors que la voix et les vidéos sont prioritaires.

Pour chaque AC, l'accès au canal suit DCF mais utilise un ensemble de paramètres d'accès au canal EDCA différenciés. Si une trame d'un flux de priorité supérieure doit être envoyée, elle attend en moyenne moins de temps que celle avec une priorité inférieure. En conséquence, les données ayant une priorité plus élevée ont une meilleure chance d'accéder au canal et d'être envoyées. Ceci est accompli grâce à la modification des paramètres d'interruption dans le CSMA/CA traditionnel. Ainsi, les données sensibles aux retards sont protégées et la QoS est mieux prise en charge.

Dans l'EDCA, une station peut accéder au canal sans contention pendant la période de sa TXOP. Dans la période de temps limitée d'un TXOP, une station peut envoyer un certain nombre de trames, étant donné que les transmissions ne dépassent pas la limite de durée du TXOP. Dans le cas où une trame est trop grande pour être transmise dans un seul TXOP, la station doit fragmenter la trame en plusieurs trames de taille inférieure. En utilisant la limite de temps des TXOP, ceci évite qu'une station à faible débit occupe trop de temps de canal pour transmettre des trames dans un WLAN 802.11.

Contrôle d'accès au médium basé sur la contention

1. **Contrôle d'accès au médium basé sur la contention traditionnelle**

   La gestion des ressources distribuées a été adoptée dans les réseaux locaux sans fil pour sa simplicité, son évolutivité et sa robustesse par rapport à la dynamique de la topologie. Les protocoles MAC distribués ciblent le partage équitable des ressources sur un nombre inconnu de stations, tout en minimisant les délais d'accès et en maximisant le débit global. À partir du protocole ALOHA pur, des progrès significatifs ont été réalisés pour améliorer le débit et la stabilité des protocoles MAC basés sur CSMA. Le protocole IEEE 802.11 DCF adopte le mécanisme CSMA en détectant la porteuse dans le canal sans fil avant la transmission.

   Les stations basées sur la norme 802.11 sont en semi-duplex, car elles ne peuvent pas écouter le canal (détecter la porteuse) lors de la transmission. Par conséquent, les collisions ne peuvent pas être détectées dans l'environnement radio, comme dans le cas des réseaux câblés. Par conséquent, un périphérique 802.11 attend un délai d'attente avant chaque transmission de trame pour éviter les collisions. Un avantage majeur de la méthode CSMA / CA, adoptée par DCF, est que la procédure d'accès aux canaux est simple et facile à mettre en œuvre, car un contrôleur centralisé et une synchronisation stricte sur l'interface

radio pour la synchronisation ne sont pas nécessaires. Par conséquent, le mécanisme CSMA / CA prend facilement en charge la mobilité et l'évolutivité du réseau.

Trois règles fondamentales du DCF :

(a) Écouter le canal avant de transmettre pendant une durée de temps (DIFS) (fonction de coordination) InterFrame Space (IFS). En effet, Une station doit vérifier si le support est inactif ou non avant d'essayer d'envoyer une trame. S'il est inactif, la station peut envoyer la trame. Cependant, si le canal est occupé ou devient occupé pendant le DIFS, la station doit être en attente d'un délai aléatoire.

(b) Utiliser un algorithme de backoff pour éviter les collisions. Si le canal est occupé ou si une collision se produit, la station effectue une interruption et écoute à nouveau le canal.

(c) Utiliser un schéma d'accusé de réception positif pour assurer la fiabilité. En effet, la station de destination répond par un ACK pour informer la station source de la bonne réception. Dans le cas contraire une retransmission des trames est effectuée.

2. **Contrôle d'accès moyen basé sur la contention prioritaire**
Pour mieux prendre en charge le trafic multimédia, le mécanisme CSMA de base peut être étendu pour fournir une différenciation de service. Le mécanisme CSMA prioritaire permet aux classes de trafic avec des priorités plus élevées (telles que les paquets audio / vidéo) d'accéder aux canaux plus tôt. Pour prendre en charge la qualité de service dans la planification des ressources de canal, il est nécessaire de définir la classification du trafic et les entités de compensation indépendantes différenciées, comme indiqué dans cette partie.

(a) **Catégories d'accès (AC)**
Les flux de trafic sont classés et hiérarchisés en fonction de leurs exigences de qualité de service. Par exemple, quatre buffers sont définis dans IEEE 802.11p.

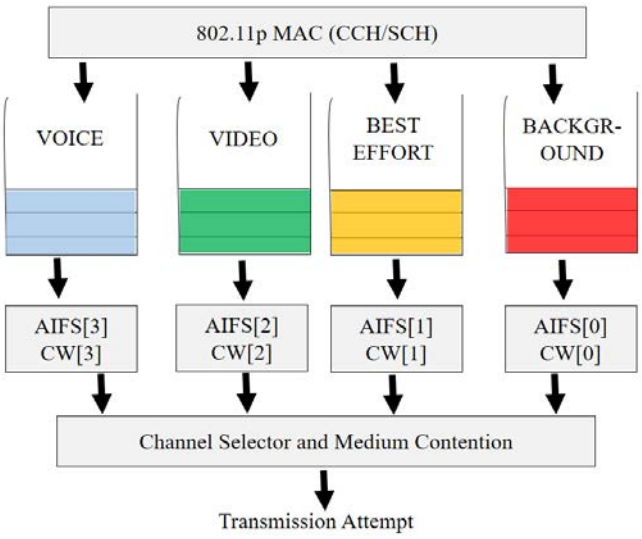


FIGURE 3.2 – Quatre catégories d'accès dans le standard IEEE 802.11p.

Les AC sont étiquetés en fonction de leurs applications cibles, qui comprend AC[VO]/AC[3](voix), AC[VI]/AC[2] (vidéo), AC[BE]/AC[1] (meilleur effort) et AC[BK]/AC[0] (Background).

Habituellement, le trafic sensible aux retards, comme les données vocales et vidéo en temps réel, se voit attribuer des priorités élevées, tandis que le trafic tolérant aux délais, tel que le courrier électronique et le transfert de fichiers, se voit attribuer de faibles priorités. Différents ensembles de paramètres, y compris l'espacement inter-trame, la taille CW et la durée des opportunités de transmission (TXOP), sont définis et associés aux AC pour fournir des priorités dans les conflits d'accès au support. L'architecture des quatre entités de secours parallèles dans une station 802.11p est illustrée à la Figure 3.2 .

(b) **Mécanismes de différenciation des services**

Pour assurer la différenciation des services, une différentiation est apportée au niveau de la taille de la CW, de la durée de l'IFS et de la longueur de trame maximale pour les différents services. Le protocole EDCA défini peut permettre un accès moyen prioritaire aux applications ayant des exigences de qualité de service. Chaque AC dans une seule station doit être considérée et se comporter comme une station virtuelle. Ainsi, l'accès au canal prioritaire est effectué à la fois par contention différenciée interne (intra-station) et externe (inter-station) entre les AC.

i. **Conflit intra-station** Une station peut avoir plusieurs flux de trafic appartenant à différents AC. Chaque classe de priorité possède sa propre file d'attente et son propre compteur. Des collisions peuvent se produire entre les flux dans différents AC d'une même station. Lorsque les compteurs d'attente de deux ou plusieurs files d'attente atteignent zéro dans le même intervalle de temps, ces files d'attente ont une collision interne. Dans ce cas, la collision interne est résolue dans la station. La trame avec la plus haute priorité a la chance d'être envoyée. Pendant ce temps, les autres trames de priorité inférieure effectueront une temporisation et se comporteront comme si elles avaient été envoyées et ont eu une collision externe avec d'autres stations.

ii. **Conflit inter-stations** Les flux de trafic des différentes stations peuvent transmettre des trames en même temps. Dans ce cas, les signaux provenant des stations entrent en collision dans le canal commun. Sans les accusés de réception pour ces trames, les expéditeurs effectuent des temporisations.

La Figure 3.3 illustre un exemple de contestation de l'accès au support et de la hiérarchisation établie par T_{AIFS}. Nous pouvons voir qu'une trame vocale et une trame best effort sont en concurrence pour avoir accès au support. Le temps d'attente plus faible de la AC voix lui permet d'accéder au support au détriment du Best Effort.

La priorisation est établie en fonction du temps d'attente T_{AIFS} (espace d'arbitrage temporel), représentant le temps nécessaire pour accéder au support pour chaque AC. Il permet une priorisation différente des trames en fonction du type de traçage. Par exemple, un court T_{AIFS} raccourcira le temps entre deux trames et surtout un temps d'accès plus court au support. La valeur T_{AIFS} est donnée par [36] :

$$T_{AIFS}[AC] = AIFSN[AC] * aSlotTime + SIFS \tag{3.1}$$

où l'AC est le AC de chaque type de trafic, $AIFSN[AC]$ (numéro inter-trame d'arbitrage) est la constante prédéfinie correspondant à chaque AC. Les Inter-Frame Space (SIFS) et aSlotTime sont des intervalles constants prédéfinis dans la norme définie respectivement à 32 µs et 13 µs. Les fenêtres de contention (CW) constituent une autre différence entre les AC [10, 36].

Les valeurs de chaque AC sont données dans le Tableau 3.1. Les différentes valeurs AIFSN et CW sont choisies pour les différents types d'AC dans le canal de contrôle (CCH) et les canaux de services (SCH). Nous vérifions que la priorité AC vidéo est supérieure à celle du Best Effort et du Background représentés par un T_{AIFS} plus petit.

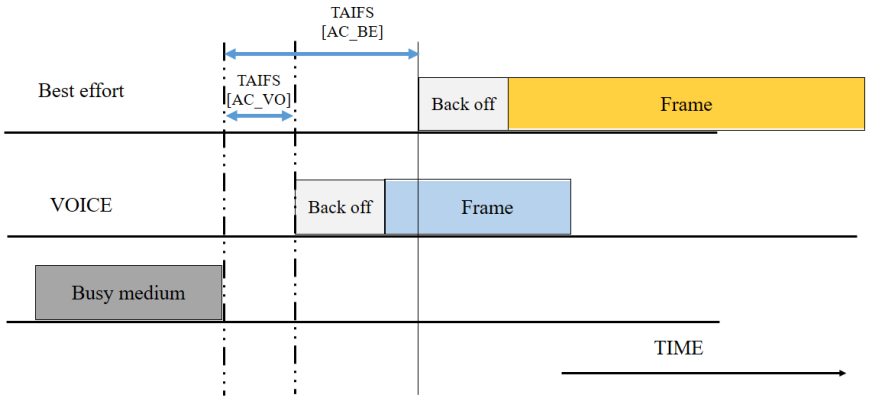


FIGURE 3.3 – Exemple de concurrence pour l'accès au support dans EDCA IEEE 802.11p.

Numéro AC	Catégorie d'accès	CCH				SCH			
		CWmin	CWmax	AIFSN	T_{AIFS} (µs)	CWmin	CWmax	AIFSN	T_{AIFS} (µs)
0	Background Traffic (BK)	15	1023	9	149	31	1023	7	123
1	Best Effort (BE)	7	15	6	110	31	1023	3	71
2	Video(VI)	3	7	3	71	15	31	2	58
3	Voice(VO)	3	7	2	58	7	15	2	58

TABLEAU 3.1 – Catégories d'accès du standard IEEE 802.11p

3.2.2 Vue d'ensemble des modes d'encodage H265 / HEVC

Les applications multimédias ont souvent des exigences de qualité de service (QoS) strictes en termes de débit, de délai, de gigue de délai et de taux de distribution. Par exemple, avec les technologies de codage vidéo, les débits de données moyens de flux vidéo haute définition (HD) de haute qualité sont considérablement réduits, mais un codage source plus agressifs entraînent un burstiness (le rapport pic à moyenne) dans le trafic de streaming vidéo. Ces caractéristiques entraînent de grandes difficultés dans la gestion du trafic multimédia. Différentes applications multimédias ont des caractéristiques de trafic différentes, qui affectent directement le comportement de mise en file d'attente du réseau et les performances du système. Comme expliqué dans la partie 1, la norme de codec vidéo H.264 / AVC (MPEG-4 Part 10) a été largement utilisée pour transmettre et stocker du contenu vidéo HD grâce à son efficacité de compression élevée. Les flux vidéo ont un taux de rafraîchissement constant, généralement 30 images par seconde et les images sont codées en utilisant trois techniques de codage. Ceci donne trois types

d'images vidéo, à savoir les images I, P et B. Les images I sont encodées indépendamment et ont des tailles d'image plus grandes, tandis que les images P et B sont codées en se référant à d'autres images et sont donc beaucoup moins gourmandes en termes de données.

Étant donné que la taille maximale de l'unité de transmission maximale (MTU) utilisée dans la couche liaison, est généralement inférieure à celle d'un paquet de données représentant une image vidéo, les images vidéo compressées sont segmentées et encapsulées dans plusieurs trames de couche liaison. Étant donné que l'intervalle entre les trames est fixe, la variation spectaculaire de la taille des trames vidéo dans un même GOP et entre différents GOP entraîne de fortes variations dans le trafic vidéo. Ainsi, le rapport crête à moyenne du débit de données instantané est important.

D'autre part, les applications multimédias et les appareils mobiles doivent répondre à une variété de besoins de service à prendre en compte lors de la conception de solutions efficaces de gestion des ressources. Les principales mesures de qualité de service pour les applications multimédias incluent le délai, la gigue, le débit et la perte de paquets.

Le délai de transmission d'une trame bout en bout, le temps écoulé entre l'arrivée d'une trame dans sa station source et le moment où elle est reçue par la station de destination, est un indice QoS clé dans les WLAN. Hormis le temps d'encodage qui dépend en grande partie des caractéristiques matérielles, le temps d'attente dans la mémoire tampon de la station source (délai de mise en file d'attente) et le temps d'attente pour obtenir des opportunités de transmission jusqu'à ce qu'elles soient transmises avec succès (délai d'accès au canal) pour une trame sont les principaux composants du délai de bout en bout dans un réseau WLAN. Les autres composants de délai de propagation et le temps de réception, sont relativement faibles et peuvent donc être négligeables. Le débit est lié au débit de transfert de données de la source vers la destination, défini comme la quantité de données reçue avec succès dans une unité de temps. Les paquets peuvent être perdus lors de transmissions pour diverses raisons, telles qu'une erreur de transmission, un dépassement de tampon, une collision, etc., ce qui nous amène à utiliser le taux de perte de paquets comme métrique d'évaluation.

Structures de codage

Dans cette section, l'organisation générale des flux binaires HEVC et des séquences vidéo HEVC décodées est expliquée. Les types d'image et la partition des images codées en différents types d'unités et de blocs spécifient les structures spatiales et temporelles utilisées pour représenter la séquence vidéo codée. En raison de la forte corrélation entre la structure spatio-temporelle et la représentation codée, certains aspects de la représentation du flux binaire sont mentionnés. Les termes utilisés ici incluent l'unité NAL (Network Abstraction Layer), l'ensemble de paramètres vidéo (VPS), l'ensemble de paramètres de séquence (SPS) et l'ensemble de paramètres d'image (PPS) [86].

Les structures de codage décrivent l'ordre de codage des images par rapport à l'ordre de sortie dans lequel les images sont finalement arrangées. Ainsi, la structure de codage choisie a un impact sur le retard structurel de la séquence vidéo codée, c'est-à-dire sur le nombre maximum d'images précédant une image dans l'ordre de sortie. Ce décalage est également appelé augmentation de la latence maximale et est indiqué dans le SPS en tant que caractérisation de la séquence vidéo codée.

1. **Structures de codage temporel**
   Une vidéo d'un nombre donné d'images peut être divisée en une ou plusieurs séquences vidéo codées ou CVS (Coded Video Sequence). Chaque CVS peut être décodée indépendamment des autres séquences vidéo codées pouvant être contenues dans le même flux binaire. De ce fait, l'ordre de sortie des images est l'ordre dans lequel les images ont été

générées et dans lequel les images doivent être affichées pour qu'elles soient identiques à l'ordre d'image de la séquence d'entrée d'origine. Dans la spécification, l'ordre de sortie est représenté par le POC (Picture Order Count), qui identifie de manière unique une image dans la séquence vidéo codée. L'ordre de codage spécifie l'ordre dans lequel les images sont reconstituées au décodeur et, par conséquence, définit quelles images peuvent être utilisées comme référence. Seule une image précédemment décodée peut être utilisée pour la prédiction. Les dépendances entre les images déterminent la structure de codage de la séquence vidéo codée. La structure de codage comprend un ensemble d'images consécutives dans la séquence avec un ordre de codage spécifique et des dépendances définies entre les images incluses. La séquence vidéo complète peut être représentée par une répétition périodique de cette structure de codage. Aussi, la première image d'un GOP dans l'ordre de codage est appelée image d'ancrage ou image clé du GOP. Deux exemples de structures de codage existent :

— une structure de codage où toutes les images du GOP sont prédites à partir d'images passées codées
— une structure de codage où l'ordre de codage est différent de l'ordre de sortie, c'est-à-dire que certaines images doivent être stockées jusqu'à ce qu'elles soient sorties.

Pour la première structure la prédiction se fait uniquement sur les images passées ce qui signifie qu'il n'y a aucune dépendance entre une image codée et une image future dans l'ordre de sortie. L'ordre de codage des images correspond en fait à l'ordre de sortie, c'est-à-dire l'ordre dans lequel les images doivent être affichées. Ce type de prédiction peut également avoir deux formes :

— chaque image utilise une image de référence unique pour la prédiction. Historiquement, La prédiction à partir d'une seule référence sont appelées images P.
— chaque image utilise deux images de référence dans cette forme d'encodage, la structure de codage présente une certaine hiérarchie des images avec de nouveau type d'image en comparaison à l'H.264/ AVC appelé GBP. De ce fait, certaines images peuvent être supprimées sans affecter la décodabilité des autres images. Etant donné que la structure de codage des autres images est indépendante de ces images. Une telle structure est appelée structure de codage hiérarchique, appelée structure hiérarchique-B.

Pour le deuxième type de prédiction, la prédiction se fait sur la base des images passées ainsi que des images futures. Pour cette structure de codage, l'ordre de codage est différent de l'ordre de sortie. Cela induit le retard structurel décrit précédemment. Les structures de codage avec des références du passé et du futur sont généralement utilisées avec la bi-prédiction, où la prédiction d'une image est formée par la combinaison de deux références. Ces images sont appelées «images B». Cette structure présente une hiérarchie de prédiction dans laquelle les dépendances de prédiction sont imbriquées de sorte que certaines images peuvent être supprimées sans que cela ait une incidence sur la décodabilité des autres images. Une telle structure est appelée structure de codage «hiérarchique-B».

Il peut y avoir des relations de prédiction entre des GOP consécutifs d'une structure de codage. Appelée également structure de codage Open-GOP : image de référence GOP provenant d'un GOP différent. A l'inverse, les structures qui omettent les interdépendances entre les GOP consécutifs sont appelées structures de codage Closed-GOP. La spécification HEVC comprend un message SEI (informations complémentaires) sur la «structure des images» qui peut être utilisée par le codeur pour décrire la structure GOP utilisée, y compris les types d'image correspondants, les ensembles d'images de référence applicables et la relation temporelle entre les images dans le GOP.

2. **Couches Temporelles**

   Dans HEVC, un concept de couche temporelle très similaire au concept de couche temporelle pour la scalabilité temporelle dans H.264/ AVC est disponible dans la spécification de base. Chaque image est associée à un identifiant ID de niveau temporel. Avec le concept de couches temporelles, l'extraction d'une séquence vidéo codée de résolution temporelle inférieure à partir d'une séquence vidéo donnée peut être réalisée simplement en éliminant toutes les unités NAL dont l'ID est supérieur à une valeur sélectionnée. Les images avec un ID inférieur ne doivent pas se référer à une image avec un ID supérieur ou égal pour la prédiction dans un GOP.

3. **Types d'images**

   Le type d'image est une indication du rôle de l'image donnée dans la séquence vidéo codée. Le type d'image est indiqué par le type d'unité NAL des données vidéo codées. HEVC spécifie quatre classes de types d'image :

   — Random Access Point Pictures
   — Leading Pictures
   — Temporal Sub-Level Access Pictures
   — Trailing Pictures

   Pour chacune de ces classes, un ensemble de variantes peut être indiqué. Cette variété fournit des indications explicites sur l'organisation et la structure de codage du flux binaire au niveau le plus élevé possible (c'est-à-dire l'en-tête d'unité NAL). Il comprend des informations sur l'image en cours, mais peut également fournir des informations sur d'autres images associées à l'image en cours. Ce type d'informations peut être utile pour le traitement externe et les éléments de réseau compatibles avec les médias. Les types d'image, leurs contraintes et leur utilisation dans différents scénarios sont détaillés ci-après.

   — Random Access Point Pictures
     Le terme point d'accès aléatoire (RAP) indique la caractéristique principale de ce type d'image : le décodage peut être lancé à partir de ces images. Uniquement un encodage intra est appliqué sur Les images RAP. Par conséquent, les images de points d'accès aléatoires sont désignées par l'acronyme IRAP (pour intra random access point). Les types d'image qui fournissent la fonctionnalité de point d'accès aléatoire sont détaillés ci-dessous.
     — Instantaneous Decoder Refresh Picture (IDR)
       Une image IDR réinitialise le processus de décodage et lance toujours une nouvelle séquence vidéo codée. Le concept de rafraîchissement instantané du décodeur (IDR) a été utilisé dans H.264 | AVC avant. Si une image IDR est reçue au décodeur, le tampon d'image décodée est réinitialisé avant le décodage de l'image IDR. Par conséquent, une IDR ne peut être référencée qu'à partir d'images qui suivent l'image IDR dans l'ordre de codage. Les images précédant l'IDR dans l'ordre de codage sont supprimées et ne sont donc pas disponibles pour une prédiction.
     — Clean Random Access Picture (CRA)
       Contrairement à l'IDR, l'image CRA ne réinitialise pas le tampon d'image de référence et ne lance pas nécessairement une nouvelle séquence vidéo codée. Lorsqu'elle est décodée, une image CRA peut apparaître dans une séquence vidéo codée. Le type CRA indique que le processus de décodage peut être démarré avec l'image actuelle. Lors de l'analyse du flux binaire, les images CRA détectées indiquent les points d'entrée potentiels pour le décodage de la séquence vidéo. Le résultat du décodage après un tel nouveau départ est censé être conforme aux spécifications

des images qui suivent le CRA. Les images de CRA sont particulièrement utiles pour les applications dans les structures de codage «open-GOP».
Un troisième type de IRAP existe qui est le BLA (Broken Link Access Picture).

— Leading Pictures
Une Leading Pictures précède toujours l'image du IRAP point d'accès aléatoire associé dans l'ordre de sortie, mais la suit dans l'ordre de codage. Selon les images de référence utilisées pour la prédiction inter-image, une Leading Pictures peut ou non dépendre des images qui précèdent l'IRAP associé dans l'ordre de décodage. L'existence d'une telle dépendance caractérise les deux types d'images spécifiés pour les images principales. Les Leading Pictures peuvent contenir des tranches I, P ou B ou des combinaisons de celles-ci. La propriété de dépendance n'est pertinente que si au moins une tranche non-I est présente dans l'image.

— Temporal Sub-Level Access Pictures
La structure de codage temporel d'une séquence vidéo codée peut être organisée de manière à permettre le décodage de sous-ensembles d'images dans la séquence représentant différentes résolutions temporelles. Seules les dépendances hiérarchiques existent, de l'ID inférieur à l'ID supérieur ou égal. Là encore deux types d'image existent : TSA (Temporal Sub-Access Access) qui permet passer au décodage d'une couche temporelle supérieure et STSA (Step-Temporal Sub-Access Access) qui permet uniquement de basculer vers la même couche temporelle que l'image de prédiction.

— Trailing Pictures
Elles suivent l'image IRAP associée dans l'ordre de sortie ainsi que dans l'ordre de codage. Ce type d'image regroupe toutes les images qui ne relèvent d'aucune des catégories mentionnées précédemment.

4. **Paramètres de structure de prédiction du HEVC**
Dans HEVC, quatre structures de prédiction ont été définies [79] :

— All Intra (AI)
— Random Access (RA)
— Low Delay P (LDP)
— Low Delay B (LDB)

Dans ces configurations, la valeur QP (Quantization Parameter) peut être modifiée en y ajoutant une valeur "QP offset". En d'autres termes, le QP est défini pour la première image (QP d'une image I, QPI) et le QP des images suivantes est dérivé comme QP offset, le décalage QP étant déterminé en fonction du type d'image ou de l'ID temporel de l'image.

(a) **All Intra (AI)**
dans cette configuration, toutes les images sont codées séparément avec une prédiction intra uniquement. Étant donné qu'aucune prédiction inter-image n'est utilisée, elle convient donc aux applications à faible délai et à haut débit.

(b) **Accès aléatoire (RA)**
Dans cette configuration, une structure hiérarchique B est utilisée. La Figure 3.4 montre un exemple de cette structure de prédiction. Dans ce cas le codage est à très haute performance de compression, où les flux binaires permettent d'entamer le décodage d'un GOP de la séquence à peu près toutes les secondes (variable en fonction du débit de l'image). L'ordre de codage et l'ordre de sortie des images diffèrent et induisent ainsi un retard de codage structurel. Cette configuration représente des applications de diffusion et de streaming. Il y a cependant un retard plus important dû à la réorganisation des images.

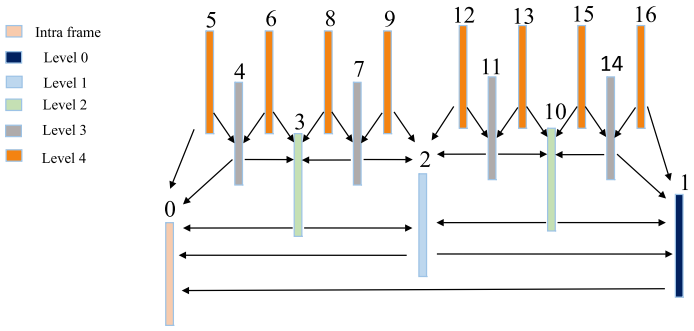


FIGURE 3.4 – Présentation graphique de la configuration de l'accès aléatoire.

(c) **Image Low Delay P (LDP)**
Dans cette configuration, la première image est codée en tant qu'image I et les images suivantes sont codées en tant qu'images P uni-prédictive. Le codage se fait sans délai structurel (ordre de codage égal à l'ordre de sortie) ainsi le réarrangement des images n'étant pas autorisé et seules les images passées sont utilisées pour la prédiction.

(d) **Image Low Delay B (LDB)**
Dans cette configuration, similaire à la configuration précédente, la réorganisation des images n'est pas autorisée. La première image est codée comme une image I et les images suivantes sont encodées en images GPB bi-prédictive. De plus, étant donné que les images GPB passées sont utilisées pour la prédiction, un retard de codage faible, similaire à celui du protocole LDP, mais avec une efficacité de codage plus élevée (en raison de la bi-prédiction) est obtenue. La Figure 3.5 montre un exemple de cette structure de prédiction.

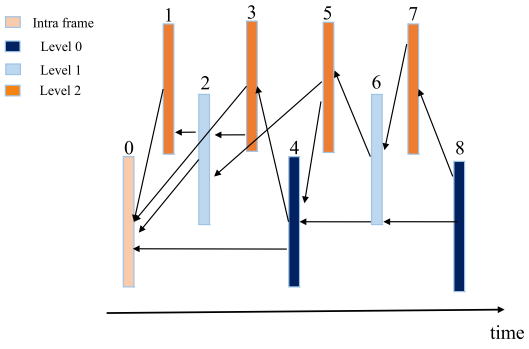


FIGURE 3.5 – Présentation graphique de la configuration Low Delay B.

3.2.3 Travaux connexes

Concernant la transmission vidéo dans les VANETs, certaines améliorations ont été apportées aux protocoles MAC pour les applications de sécurité dans les VANET. Gupta et al. [36] ont présenté une étude complète de certaines de ces travaux. L'étude menée dans [43], donne

un aperçu détaillé des stratégies de conception de couches croisées et des défis qui leur sont associés dans les réseaux VANET. L'étude menée explore différents schémas transversaux dans les différentes couches du modèle d'interconnexion de systèmes ouverts (modèle OSI). Des améliorations ont également été apportées à l'EDCA dans le cas de la transmission vidéo sur la norme IEEE 802.11e. Ksentini et al. [53] ont été les précurseurs avec l'idée d'utiliser les autres AC que l'EDCA met à disposition en fonction de l'importance du codage vidéo. Les auteurs ont proposé une architecture inter-couche pour améliorer la transmission vidéo H.264 sur un réseau IEEE 802.11e en utilisant un algorithme d'acheminement, basé sur la spécification de trafic de l'EDCA du IEEE 802.11e. Cependant, cet acheminement est statique et ne prend pas en compte l'état du réseau.

Lin et al. [59] ont proposé un algorithme de cartographie adaptatif à couches multiples pour améliorer la qualité de diffusion des vidéos MPEG-4 Part 2 sur les réseaux sans fil IEEE 802.11e. L'amélioration de la qualité de la vidéo est obtenue en exploitant les caractéristiques hiérarchiques des images vidéo et en transmettant les informations de signification des données vidéo de la couche application à la couche MAC dans une architecture de conception inter-couches. En outre, l'acheminement du paquet vidéo sur l'AC approprié dépend de l'état du trafic réseau et de l'importance de la trame vidéo. Ke et al. [49] ont proposé un autre algorithme dans lequel ils ont ajouté une considération des actions effectuées sur les paquets précédents de la même image vidéo. Mai et al. [61] ont implémenté un système inter-couches pour la diffusion vidéo H.264 / AVC sur les réseaux sans fil IEEE 802.11e. Le mécanisme proposé rend plus efficace l'utilisation de la ressource radio pour estimer le temps d'attente d'accès de chaque AC en sélectionnant pour chaque paquet la destination AC avec le temps d'attente d'accès le plus petit attendu. Cependant, les travaux répertoriés pour les méthodes inter-couche sont spécifiques à IEEE 802.11e et basés sur d'anciennes normes de codage vidéo. Ces travaux ne prennent pas en compte le changement de structure de prédiction temporelle que le codeur vidéo peut induire. En outre, ils ne prennent pas en compte le problème de latence pour une transmission à faible délai.

En effet, les encodeurs vidéo utilisés ou les techniques proposées introduisent une latence assez importante réservée aux applications insensibles au retard. Chen et al. [15] ont établi un modèle de mesure de délai-retard dans un système de communication vidéo sans fil. À cette fin, ils ont utilisé le mode IPPPP du H.264. Le modèle proposé permet d'établir une relation fonctionnelle entre le temps de codage vidéo, le débit dans le codeur vidéo et la distorsion de la source. Tandis que Kokkonis et al. [51] ont proposé un algorithme pour la transmission en temps réel d'un flux H.265 / HEVC avec des données haptiques sur Internet. L'algorithme choisit la prédiction temporelle optimale à utiliser en tenant compte des temps de codage et de décodage HEVC ainsi que de la qualité de service du réseau. Ils ont en outre montré l'influence de l'ordre de codage des trames dans un groupe d'images (GOP) sur le retard de bout en bout et entrepris des tests comparatifs entre H.264 et HEVC. Vinel et al. [93] ont fourni une approche d'adaptation de canal codec en temps réel dans une norme de transmission vidéo sur IEEE 802.11p. Le modèle de bout en bout est proposé pour une application d'assistance de dépassement basée sur la vidéo avec une latence maximale de bout en bout qui ne doit pas dépasser 200 ms en estimation.

3.3 Solution 1 : Mécanisme inter-couches adaptatif pour la structure de prédiction temporelle à faible retard du HEVC

Dans cette sous-section, nous décrivons notre système inter-couches original. Comme indiqué dans ce chapitre, la transmission de la vidéo au niveau de la couche MAC de la norme IEEE 802.11p conventionnelle se fait uniquement sur la vidéo AC dédiée. Nous proposons ici

d'exploiter les deux autres AC de moindre priorité afin d'éviter la congestion du réseau et le débordement ultérieur des paquets vidéo. Notre système étant développé et valable pour différentes configurations, nous avons néanmoins commencé par nous concentrer sur une adaptation destinée à la structure Low Delay du HEVC. Pour cela, nous envisageons deux solutions de faible complexité pour une transmission vidéo à faible latence :

— L'adaptation de la structure temporelle de l'encodage low delay du HEVC.
— Un algorithme d'acheminement adaptatif basé sur le type d'image issue de l'encodage Low Delay.

La configuration à faible délai nécessite une optimisation pour améliorer la résilience des erreurs et ainsi réduire la propagation des erreurs temporelles dans les canaux de transmission vidéo sujets aux erreurs. La modification de la prédiction temporelle par l'introduction d'un point d'accès aléatoire intra (IRAP) permet de stopper la propagation des erreurs dans une séquence vidéo. Comme expliqué précédemment la norme HEVC comprend plusieurs types d'IRAP. Pour notre cas et après une étude comparative, développée dans la section 3.4.4, nous décidons d'introduire des images IDR insérées à intervalles réguliers. Cela rafraîchit complètement le processus de décodage et lance une nouvelle séquence vidéo codée (CVS). Cela signifie que ni l'image IDR ni aucune image qui suit l'image IDR dans l'ordre de décodage ne peut dépendre d'une image qui précède l'image IDR dans l'ordre de décodage.

La prédiction temporelle modifiée à faible retard est représentée sur les Figures 3.6 et 3.7 respectivement pour la structure Low Delay B et Low delay P. Ceci permet d'éviter une grave propagation d'erreur au prix d'une augmentation du débit d'environ 10% selon notre estimation sur plusieurs séquences vidéo.

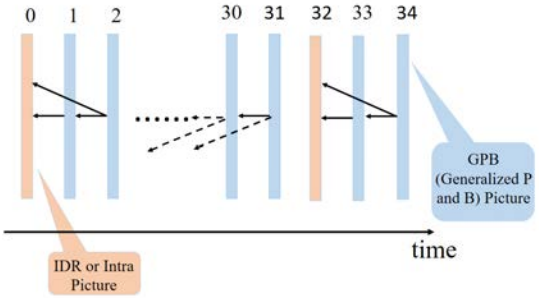


FIGURE 3.6 – Présentation graphique de la configuration modifiée de la structure Low Delay B.

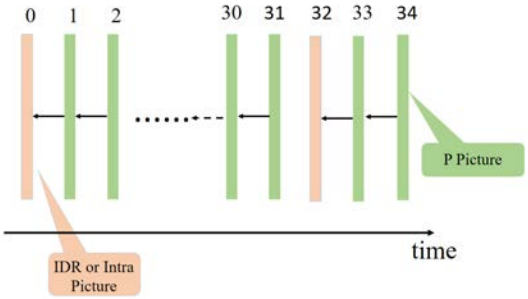


FIGURE 3.7 – Présentation graphique de la configuration modifiée de la structure Low Delay P.

3.3.1 Algorithme d'acheminement adaptatif basé sur le type d'image

L'algorithme d'acheminement adaptatif proposé alloue dynamiquement à chaque paquet vidéo l'AC le plus approprié à la couche MAC. Il tient compte de l'importance de l'image et de l'état de charge du trafic réseau reflété par la longueur de la file d'attente de l'émetteur. De plus, l'objectif étant de protéger les images les plus importantes, nous devons accorder à chaque type d'image un traitement spécifique, au moyen d'une probabilité d'acheminement différent pour les AC avec une priorité inférieure. Définis comme P_{type}, les probabilités sont établies entre $0 \leq P_{type_IDR} \leq P_{type_x} < 1$, où x peut être GPB ou P. Sachant que plus la file d'attente MAC est remplie, plus le réseau est surchargé. L'état de remplissage des files d'attente AC sera utilisé pour mesurer l'état de charge du trafic réseau. En exploitant le concept de mécanisme de détection précoce aléatoire (RED) [27], nous adoptons deux seuils, qth_{high} et qth_{low} , pour éviter la congestion du réseau. L'algorithme est basé sur l'expression suivante développée à l'origine par Lin et al. dans [59] :

$$P_{new} = P_{type_y} \times \frac{qlen(AC[2]) - qth_{low}}{qth_{high} - qth_{low}} \tag{3.2}$$

Où :

— P_{type_y} est la probabilité initiale qui est basée sur l'importance basé sur chaque image, y pouvant être IDR ou x,
— $qlen(AC[2])$ définie l'état actuel de la longueur de la file d'attente,
— qth_{high} and qth_{low} sont des seuils qui définissent le degré d'acheminement sur les AC dédié au BE et au BK.

La Figure 3.9 représente un organigramme de l'algorithme adaptatif adopté, où RN représente un nombre aléatoire conformément à $0 \leq RN < 1$. L'organigramme montre les différents cas d'utilisation des différents ACs. L'algorithme dépend du remplissage $AC2$ et définit 3 cas :

— Si $AC2$ est inférieur à qth_{low}, les paquets sont acheminés vers $AC2$.
— Si $AC2$ est compris entre qth_{low} et qth_{high}, les paquets sont acheminés sur $AC2$ et P_{new} est la probabilité d'acheminement à $AC1$.
— Enfin, si $AC2$ est supérieur à qth_{high}, les paquets sont acheminés sur $AC1$ avec P_{type} définit la probabilité d'acheminement sur $AC0$.

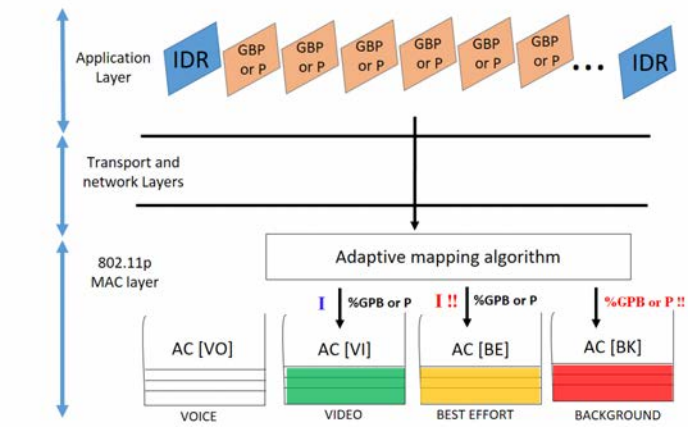


FIGURE 3.8 – Illustration de l'algorithme inter-couche adaptatif.

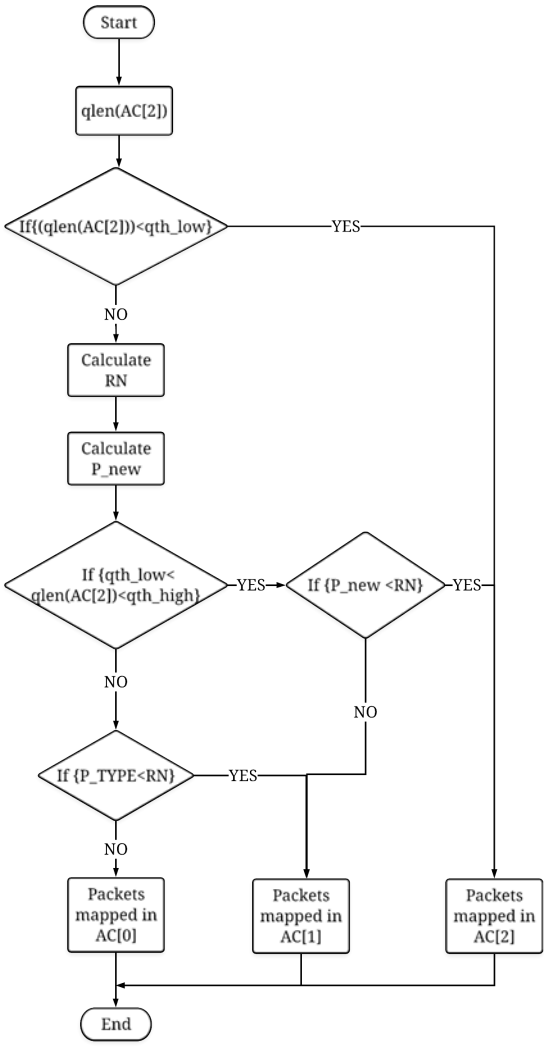


FIGURE 3.9 – Organigramme de l'algorithme inter-couche adaptatif.

La Figure 3.8 illustre l'algorithme d'acheminement adaptatif proposé. En comparaison avec l'algorithme établi par Lin et al. [59], nous avons deux types de trames nécessitant une adaptation de l'algorithme. Une étude expérimentale en terme de PSNR et de nombre de paquets reçus nous permet d'identifier les paramètres les plus appropriés de l'algorithme comme suit :

— P_{type} est définie à 0 pour les images IDR et à 0,7 pour les images GPB ou P en fonction du schéma d'encodage utilisé.
— $qth_{low} = 20$ et $qth_{high} = 45$ paquets.

Gardant ainsi les mêmes valeurs des seuils établies par Lin et al. [59].

3.3.2 Analyse de l'efficacité de l'algorithme d'acheminement adaptatif dédié à la structure LD basé sur le type d'image proposé

A travers différentes simulations, nous étudions les performances de la transmission des deux flux codés, utilisant respectivement les structures temporelles LD-P et LD-B, avec les deux mécanismes d'acheminement : l'EDCA standard et l'algorithme adaptatif. L'objectif principal est d'évaluer l'efficacité de notre méthode de transmission proposée [55].

Trois environnements de propagation différents sont considérés. Pour cela, nous utilisons trois cartes importées d'OpenStreetMap (OSM) [68]. Pour le premier environnement, nous avons modélisé un trafic urbain réaliste dans la région de Valenciennes (France), avec des véhicules ayant des vitesses et des directions aléatoires. Pour les deux autres environnements, nous avons modélisé l'autoroute (A1) entre Paris et Lille (France) sur 11 km avec des véhicules suivant la même route avec la même vitesse. Le troisième environnement est une variante du précédent, en considérant des vitesses plus élevées des véhicules ainsi qu'une densité plus faible sur l'autoroute (plus grande distance entre les véhicules).

De plus, dans une transmission de réseau véhiculaire et dans une situation réaliste, la vidéo partage la bande passante avec d'autres types d'informations. C'est pourquoi nous avons modélisé une transmission d'un flux constant sur $AC[1]$ et $AC[0]$.

Video	Configuration d'encodage	Paquets transmis	Algorithme d'acheminement	Paquets reçus E1	Paquets reçus E2	Paquets reçus E3
Highway 1000 Images 352×288	LD-B	7219	EDCA	6743	6845	6254
			Algorithme adaptatif	7065	7219	6482
	LD-P	7706	EDCA	7018	7015	6149
			Algorithme adaptatif	7538	7537	6428

Tableau 3.2 – Nombre de paquets reçus pour les différents algorithmes.

Le Tableau 3.2 indique le nombre de paquets reçus et le nombre de paquets transmis pour les deux configurations de codage (LD-B et LD-P) et les deux algorithmes d'acheminement (EDCA et adaptif). Ceci dans les différents environnements modélisés (notés E1, E2 et E3). Ainsi, plusieurs déductions peuvent être faites :

— L'encodage LD-B conduit à un nombre réduit de paquets transmis qui correspond à un gain de compression de 7% par rapport au LD-P ; cela s'explique par la bi-prédiction de la trame GPB.
— La solution adaptative génère un gain moyen de paquets reçus de 4,39% par rapport au mécanisme EDCA, dans les différents environnements établis.

— L'environnement de propagation affecte grandement la qualité de la transmission.

Pour montrer les améliorations apportées par notre algorithme adaptatif dédié aux deux structures Low Delay du HEVC, le tableau 3.3 répertorie le type de paquets perdus lors de la transmission dans l'environnement 1. Les résultats montrent la gestion différenciée des paquets vidéo, fournie par la solution adaptative proposée. Dans le cas d'une transmission LD-B, la protection des trames IDR permet de passer de 30 paquets des images IDR perdus pour l'EDCA à seulement 9 paquets perdus pour la solution adaptive. Même pour les trames GBP, un gain sur le nombre de paquets reçus est obtenu grâce aux ressources supplémentaires utilisées par l'algorithme adaptatif ($AC[1]$ et $AC[0]$).

Video	Configuration d'encodage	Paquets Transmis	Algorithme d'acheminement	Types d'image	Paquets Perdus
Highway 1000 Images 352×288	LD-B	7219	Algorithme EDCA	IDR	30
				GPB	446
			Algorithme adapatative	IDR	9
				GPB	145
	LD-P	7706	Algorithme EDCA	IDR	43
				P	645
			Algorithme Adaptatif	IDR	10
				P	158

Tableau 3.3 – Nombre et type de perte de paquets dans l'environnement 1

Le PSNR moyen de toutes les simulations effectuées est calculé pour une mesure objective de la qualité visuelle à la réception. Le Tableau 3.4 résume les différents résultats obtenus, ce qui complète les résultats de l'évaluation de la qualité de service. Nous pouvons observer :

— Gain en termes de PSNR moyen de 3,76 dB du mécanisme proposé par rapport à l'algorithme de d'acheminement du IEEE 802.11p.

— Gain moyen de 6,65 dB en PSNR avec la structure de prédiction temporelle LD-B par rapport à la structure de prédiction temporelle LD-P.

	Algorithme d'acheminement	PSNR moyen (dB) LD-B	PSNR moyen (dB) LD-P
Scénario1	Algorithme EDCA	29.70	23.23
	Algorithme adaptatif	31.92	26.18
Scénario2	Algorithme EDCA	31.95	26.71
	Algorithme adaptatif	42.43	30.49
Scénario 3	Algorithme EDCA	24.24	18.47
	Algorithme adaptatif	25.31	20.53

Tableau 3.4 – Evaluation du PSNR moyen pour chaque méthode d'acheminement et différents scénarios.

3.4 Solution 2 : Schéma adaptatif inter-couches évolué pour la diffusion HEVC à faible latence

Afin d'améliorer le système inter-couche mis en place, nous avons exploité l'encodage hiérarchique offert par HEVC. En effet, comme expliqué précédemment pour les structures d'encodage temporel LD-B, LD-P et RA, chaque image a un identificateur (ID) qui représente l'importance de l'image dans le flux vidéo. Nous avons utilisé cette hiérarchisation pour une meilleure efficacité de notre système d'acheminement. Dans cette sous-section, nous décrivons notre système inter-couche amélioré. Ce système est développé et valable pour les différentes configurations. Nous avons également établi une étude sur le délai propre à chacune des configurations. Nous envisageons deux solutions de faible complexité pour une transmission vidéo à faible latence :

— Algorithme d'acheminement inter-couches statique basé sur le codage HEVC hiérarchique.
— Algorithme d'acheminement inter-couches adaptatif basé sur le codage HEVC hiérarchique.

Les deux algorithmes d'acheminement inter-couches proposés séparent les différents paquets vidéo en trois couches différentes. Cette hiérarchisation est établie en fonction de la structure temporelle d'encodage :

— **Pour la configuration à faible délai :**
  — Couche 1 : inclut les images I et les images de niveau 0
  — Couche 2 : inclut les images de niveau 1.
  — Couche 3 : inclut les images de niveau 2.

  La Figure 3.10 donne une représentation graphique de la hiérarchisation de configuration Low Delay B modifié.

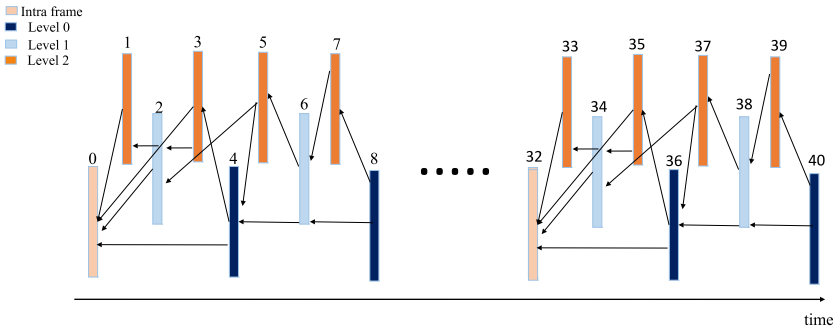


FIGURE 3.10 – Représentation graphique de la hiérarchisation de la configuration Low Delay B modifié

— **Pour la configuration à accès aléatoire :**
  — Couche 1 : inclut les images I, images de niveau 0 et niveau 1.
  — Couche 2 : inclut les images de niveau 2 et 3.
  — Couche 3 : inclut les images de niveau 4.

  La Figure 3.11 fournit une représentation graphique de la classification adoptée pour la configuration RA.

Le choix de la distribution des images a été établi en fonction de l'importance et de la taille des données compressées de chaque image. Logiquement, pour le cas particulier de la configuration All Intra, aucune classification n'a été adoptée.

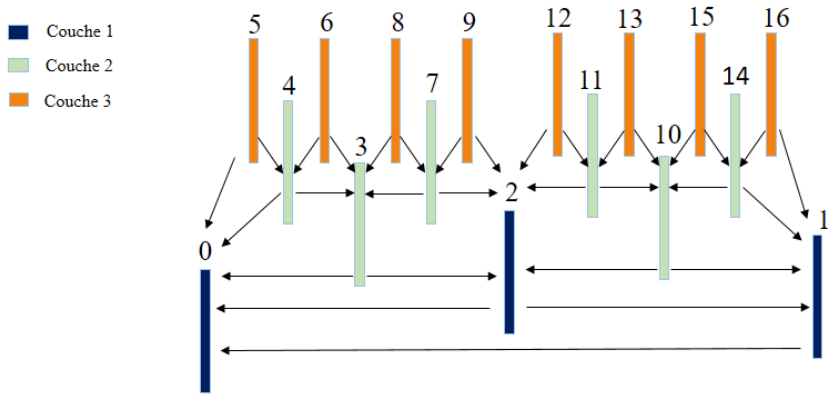


FIGURE 3.11 – Présentation graphique de la classification adoptée pour configuration RA

3.4.1 Algorithme d'acheminement inter-couches statique basé sur le codage HEVC hiérarchique

Conformément à la classification adoptée qui varie selon la structure vidéo, les images correspondant à la couche 1 sont les images les plus importantes. En effet, les images de la couche 1 ont une grande influence et affectent d'une certaine manière tout le reste du GOP. À cet égard, toute perte ou dégradation affectera l'ensemble du GOP. La quantité d'informations contenue dans les images de couche 1 est également plus grande. Au vu de ces informations, nous proposons de configurer un algorithme statique pour chaque structure vidéo où les images de couche 1 sont acheminées dans tous les cas sur l'AC utilisable avec la priorité la plus élevée, à savoir $AC[2]$.

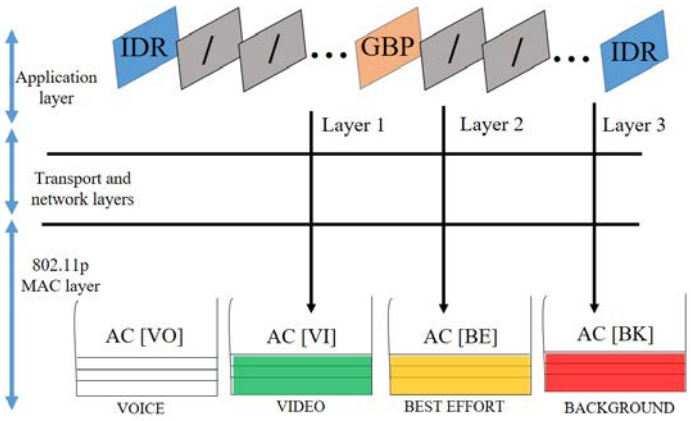


FIGURE 3.12 – Illustration de l'algorithme inter-couche statique.

Ensuite, les trames de couche 2 ayant la deuxième plus grande importance seront associées à la seconde file disponible : $AC[1]$. Ainsi, nous adoptons le principe utilisé par [53] pour

une classification des images de la vidéo. Dans notre algorithme statique, les paquets vidéo correspondant à la couche 3 seront dirigés vers la dernière file d'attente, $AC[0]$. Cela implique que pour la configuration AI, cela ne changera rien à la norme EDCA et que toutes les trames seront transmises au tampon de la file d'attente vidéo. Contrairement aux autres configurations, l'acheminement est différent. En effet, pour les configurations LD ou RA, les paquets des images correspondants à la couche 2 seront acheminés sur $AC[1]$ et les paquets des images de la couche 3 sur le $AC[0]$, comme suggéré par Ksentini et al. [53]. La Figure 3.12 illustre notre algorithme d'acheminement statique.

3.4.2 Algorithme d'acheminement inter-couches adaptative basé sur le codage HEVC hiérarchique

L'algorithme d'acheminement adaptatif proposé alloue dynamiquement à chaque paquet vidéo l'AC le plus approprié à la couche MAC. Il prend en compte la structure de prédiction temporelle de la séquence vidéo encodée, l'importance de chaque paquet selon l'ID de son image et l'état de la charge de trafic réseau. Contrairement au système basé sur le type d'image dédié à la structure LD. Le système évolué se base sur 3 niveaux de priorité. Ainsi pour bénéficier des images les plus importantes, nous devons accorder à chaque type d'image une probabilité d'acheminement pour les AC de priorité inférieure différente, définie comme P_{Layer}. La probabilité est fonction de l'importance de la trame ce qui signifie que $0 \leq P_{Layer-1} \leq P_{Layer-2} \leq P_{Layer-3} \leq 1$. Sinon, comme indiqué précédemment, l'acheminement dépend également de l'état du canal. L'état de remplissage des files d'attente AC reflète l'état de charge du trafic réseau comme expliqué précédemment. L'algorithme d'acheminement adaptatif évolué est basé sur l'expression suivante :

$$P_{new} = P_{Layer} \times \frac{qlen(AC[2]) - qth_{low}}{qth_{high} - qth_{low}} \tag{3.3}$$

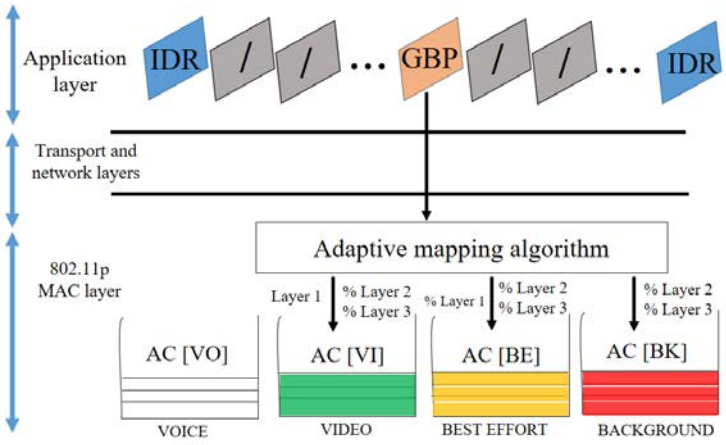


FIGURE 3.13 – Illustration de l'algorithme inter-couche adaptatif.

La Figure 3.13 illustre notre algorithme d'acheminement adaptatif. En ce qui concerne les paramètres établis pour le système et après une étude expérimentale afin de les optimiser,

nous sommes convenus que les valeurs indiquées par Lin et al. [59] restent les paramètres qui délivrent les résultats optimaux. Cette déduction est néanmoins à relativiser sachant que chaque séquence vidéo nécessitera une étude appropriée. Ainsi les paramètres choisis sont les suivants : $P_{_\text{Layer}}$ est fixée à 0 pour les trames de la couche 1, 0.6 pour les trames de la couche 2 et 0.8 pour les trames de la couche 3. Les seuils initiaux de décision sont également maintenus à 20 paquets pour $\text{qth}_{_\text{low}}$ et 45 pour $qth_{_\text{high}}$.

3.4.3 Scénarios adoptés pour l'analyse de la solution

Plusieurs simulations ont été menées pour démontrer l'efficacité des mécanismes proposés. Afin de respecter la Recommandation UIT-T P.910, précédemment évoquée, nous avons décidé d'utiliser les quatre séquences de classe C suivantes : RaceHorses, PartyScene, BasketballDrill et BQMall. La Figure 3.14 illustre les SI et TI de ces différentes séquences. Les quatre séquences ont une durée de 10 secondes mais une fréquence d'images différente, respectivement 30, 50, 50 et 60 images par seconde.

En ce qui concerne l'encodage, les séquences ont été codées avec trois configurations HEVC : LD-B, RA et AI. Pour les configurations LD et RA, nous avons retenu une même taille de GOP de 32 images. Les différentes séquences vidéo encodées sont transmises suivant deux scénarios distincts :

— Le premier scénario : seule la vidéo est transmise sur le réseau. L'objectif est d'évaluer la qualité de la vidéo au fil du temps. Aussi, d'étudier le comportement des mécanismes à travers la gestion de l'acheminement des paquets vidéo et l'état de remplissage des différents ACs. L'effet de perte de paquets sur la qualité vidéo a également été étudié. Dans ce scénario, uniquement la séquence vidéo "BQmall" a été transmise dans l'environnement urbain implémenté. La séquence vidéo a été encodée à un débit binaire plutôt élevé de 2.5 Mbps. Par ailleurs, des résultats similaires sur les autres séquences étudiées. De plus, le premier scénario nous permet également d'étudier l'influence des images IRAP (comme nous l'avons vu dans 3.2.2) sur la robustesse du flux vidéo.

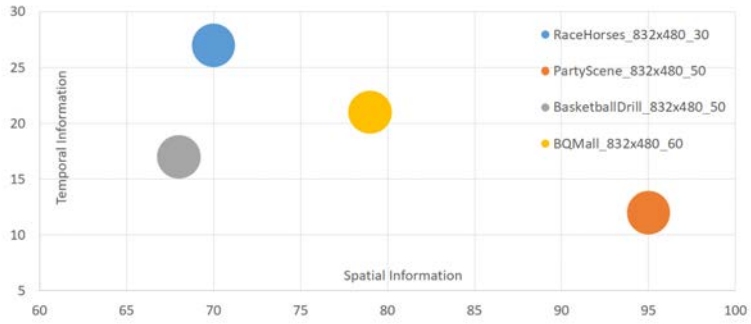


FIGURE 3.14 – Représentation des SI et TI des séquences de test utilisées.

— Le second scénario : la vidéo coexiste avec d'autres types de flux. En effet, nous simulons avec la transmission vidéo, la transmission d'un trafic vocal à travers l'$AC[0]$ mais aussi un flux TCP à travers l'$AC[1]$ et un flux UDP sur l'$AC[0]$. En ce qui concerne les données vidéo utilisées, nous avons simulé la transmission des quatre séquences mentionnées précédemment dans l'environnement autoroute implémenté. Ces vidéos ont été encodées à 1.5 Mbps.

3.4.4 Adaptation de la structure temporelle de l'encodage low delay du HEVC

La modification de la prédiction temporelle par l'introduction d'une image IRAP permet de stopper la propagation des erreurs dans une séquence vidéo et ainsi améliorer la résilience du flux vidéo aux erreurs.

En ce qui nous concerne, nous avons établi une étude comparative afin d'étudier l'effet sur la qualité de la vidéo reçue des différents points d'accès intra-aléatoires (IRAP) introduits par HEVC. En effet, nous avons simulé dans le premier scénario la transmission de différents flux vidéo encodés avec les différentes images intra codées. La Figure 3.15 illustre l'effet de différents types de codage confrontés aux mêmes conditions de canal. Les courbes concernent une configuration LD-B "standard" et trois configurations LD-B avec une image intra-codée toutes les 32 images (trame I, image CRA ou image IDR). Nous pouvons voir que la transmission d'une vidéo codée avec la configuration LD "standard" recommandée par la norme HEVC [86] provoque une rupture de la séquence vidéo reconstruite dès que la première image est perdue. Par conséquent, il n'est plus possible de décoder correctement le flux vidéo. L'insertion périodique d'image IRAP permet de retrouver de bons scores PSNR si la transmission le permet. Les images CRA et I permettent de référencer une image qui précède l'image IRAP. Cela se traduit par une récupération de flux par étapes pour I-frame ou plus lente pour CRA. Contrairement à un encodage avec une fréquence d'images IDR, qui permet d'avoir une bonne qualité vidéo représenté par un meilleur PSNR. Le PSNR moyen des différents flux vidéo reconstruits est donné dans le Tableau 3.5. Nous trouvons que la structure standard prend plus de temps pour être affectée par une perte et ceci est dû à la plus petite variation de débit. Ce résultat peut s'expliquer par l'absence d'une image intra-codée après la première image. Cependant, cela a abouti à un meilleur résultat en termes de PSNR moyen qu'une insertion I-frames. Nous pouvons également noter que le PSNR moyen pour l'insertion d'une IDR est meilleur que l'insertion d'un CRA en raison de la sévérité du canal et des nombreuses pertes d'image. L'environnement véhiculaire étant plutôt sévère, nous avons décidé d'adopter un encodage avec une trame IDR toutes les 32 images. Cela signifie que ni l'image IDR ni aucune image qui suit l'image IDR dans l'ordre de décodage ne peut dépendre d'une image qui précède l'image IDR dans l'ordre de décodage.

	Structure Lowdelay	I frames	CRA	IDR
PSNR moyen (dB)	28.90	26.85	29.21	31.71

Tableau 3.5 – Tableau des PSNR moyens.

3.4.5 Analyse de l'efficacité de l'algorithme d'acheminement adaptatif amélioré basé sur l'encodage hiérarchique du HEVC

Évaluation de la qualité vidéo avec les différents algorithmes d'acheminement

Nous reprenons ici le premier scénario. La transmission des contenus vidéo avec les trois différentes méthodes d'acheminement permet d'évaluer le gain apporté par la méthode adaptative, comme illustré à la Figure 3.16. Les courbes représentent l'évolution du PSNR des trois algorithmes d'acheminement des trames. Il est clair que la méthode adaptative (en rouge) présente une meilleure qualité en termes de PSNR. La méthode statique a de bons scores PSNR sur certains pics représentant une bonne réception des images IDR. Néanmoins, le reste des trames du GOP ont un mauvais score PSNR, conséquence de la perte des paquets d'images. Quoi qu'il en soit, la qualité vidéo est encore meilleure que la méthode EDCA. Cette dernière méthode présente un faible PSNR pour un grand nombre d'images.

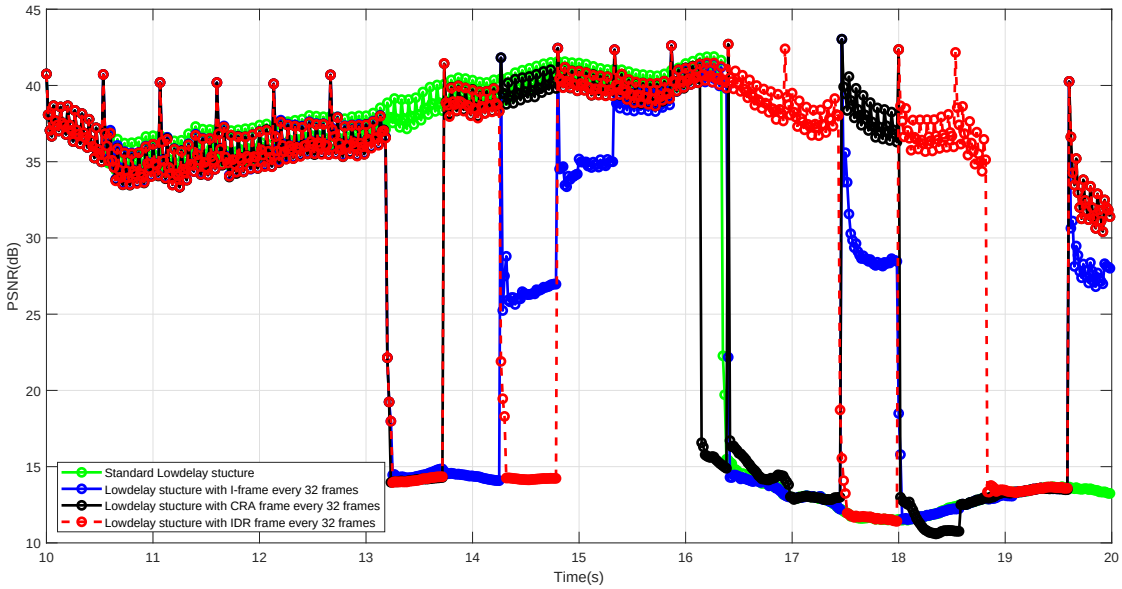


FIGURE 3.15 – L'évolution temporelle du PSNR pour les différents schémas d'encodage.

La Figure 3.16 permet également de voir l'effet de la pertes de paquets d'images de référence intra-image dans un GOP. En effet, la première perte de trame dans un GOP entraîne un faible PSNR pour tout le reste du GOP. La partie zoomée nous permet de visualiser les états précédemment discutés et servira à une analyse plus approfondie par la suite.

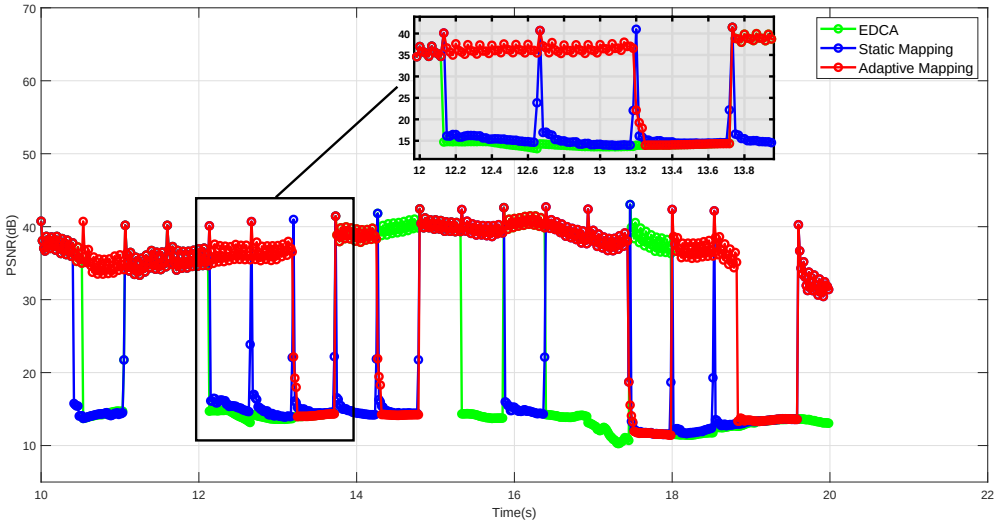


FIGURE 3.16 – Variation du PSNR pour les différents algorithmes d'acheminement : EDCA (vert), statique (bleu) et adaptatif (rouge) ; la partie zoomée montre une partie agrandie des courbes pour une durée de 2 secondes.

La différentiation des paquets vidéo ainsi que l'exploitation des ressources fournies par la norme IEEE 802.11p permettent de limiter les pertes de paquets et de protéger en particulier les paquets vidéo les plus importants. Dans le Tableau 3.6 , nous vérifions que le nombre total de paquets perdus diminue de manière significative en fonction de l'efficacité de la méthode. Cela est particulièrement vrai pour les paquets appartenant à des cadres prioritaires. La méthode EDCA a un nombre de pertes de paquets de 75 alors qu'elle est réduite à 11 pour la méthode adaptative. Dans le détail, la perte de paquets est équilibrée entre les différentes couches pour l'EDCA. Pour les méthodes statiques et adaptatives, le déséquilibre dépend également de l'importance de la couche. La protection des trames de couche 1 permet de passer de 19 paquets perdus pour l'EDCA à 9 pour l'algorithme statique et seulement 2 pour l'algorithme adaptatif. Cependant, la méthode adaptative parvient à mieux protéger les paquets des couches les plus importantes. Cela se traduit par une meilleure qualité vidéo, comme le montre le résultat du PSNR moyen de la séquence vidéo.

Algorithme d'acheminement	PSNR Moyen(dB)	Nombre de paquets perdus			
		Image layer-1	Image layer-2	Image layer-3	Total
Algorithme EDCA	23.86	19	19	37	75
Algorithme Statique	24.42	9	11	19	39
Algorithme Adaptatif	31.71	2	3	6	11

Tableau 3.6 – PSNR moyen et nombre de paquets perdus pour chaque algorithme d'acheminement

Analyse de l'état de remplissage des files d'attente pour les différents algorithmes d'acheminement

Afin d'expliquer le gain de qualité, nous analysons le remplissage des files d'attente pour les trois méthodes d'acheminement. L'analyse est faite pour la durée correspondant à la partie agrandie de la Figure 3.16. Les Figures 3.17 à 3.19 montrent l'évolution dans le temps des trois paramètres suivants pour les algorithmes EDCA, statique et adaptatif, respectivement :

— l'état de mise en file d'attente des files d'attente VI, BE et BK,
— la qualité vidéo PSNR reconstruite,
— une indication des images perdues pour les trois couches

Les axes vertical de gauche, vertical de droite et horizontal (abscisse) représentent respectivement la longueur de la file d'attente, le PSNR vidéo et le temps de simulation. Pour l'algorithme EDCA, Figure 3.17, seule l'AC dédiée à la vidéo est utilisée. Cette file d'attente atteint trois fois, au cours de la partie agrandie, la capacité maximale de la file d'attente qui provoque la chute des paquets suivants. Celles-ci provoquent des pertes d'image qui ne se produisent que sur les images de couche 1 en raison de leur plus grande taille. Dans le détail, les paquets perdus sont ceux des trames IDR. Cela affecte tout le GOP qui dépend de la trame IDR, ce qui explique les faibles valeurs PSNR au cours des trois GOP. Compte tenu du GOP suivant, aucun débordement n'a lieu et le PSNR indique une bonne qualité.

L'exploitation des deux autres files d'attente de moindre priorité permet de réduire le nombre de perte de paquets d'images, en particulier pour les images les plus importantes. La Figure 3.18 concerne l'algorithme statique, montre que l'$AC[2]$ n'est pas pleinement exploité et que le $AC[1]$ n'est pratiquement pas utilisé. L'$AC[0]$, le buffer le moins prioritaire, est le plus utilisé. Le

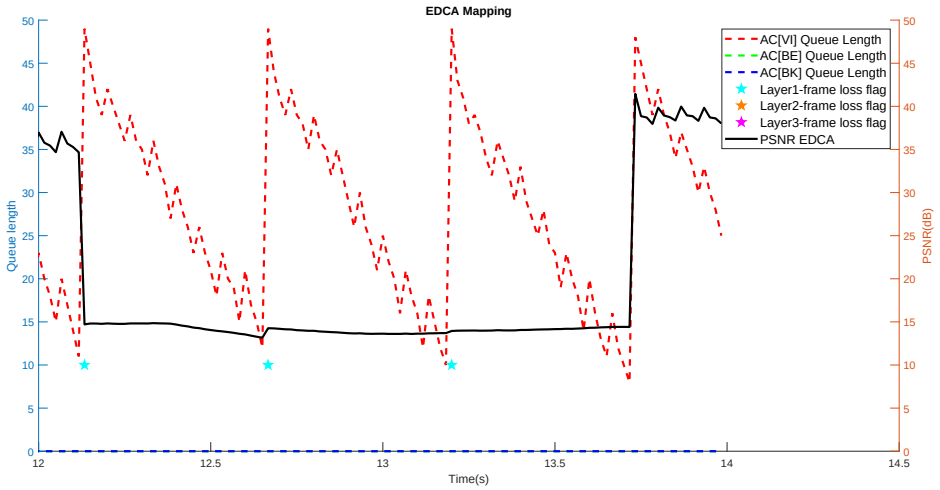


FIGURE 3.17 – Algorithme d'acheminement EDCA : état de remplissage de la file d'attente, qualité vidéo PSNR et indication des paquets d'images perdues au fil du temps.

remplissage des trois files d'attente n'atteint pas la capacité maximale sur la partie zoomée. Par conséquent, les pertes de paquets des images sont évitées. Nous pouvons cependant observer des pertes dans les paquets des images de la couche 3 dues à l'arrivée de paquets vidéo avec un retard important. Nous pouvons également constater que les paquets des images de couche 1 et 2 sont correctement reçus.

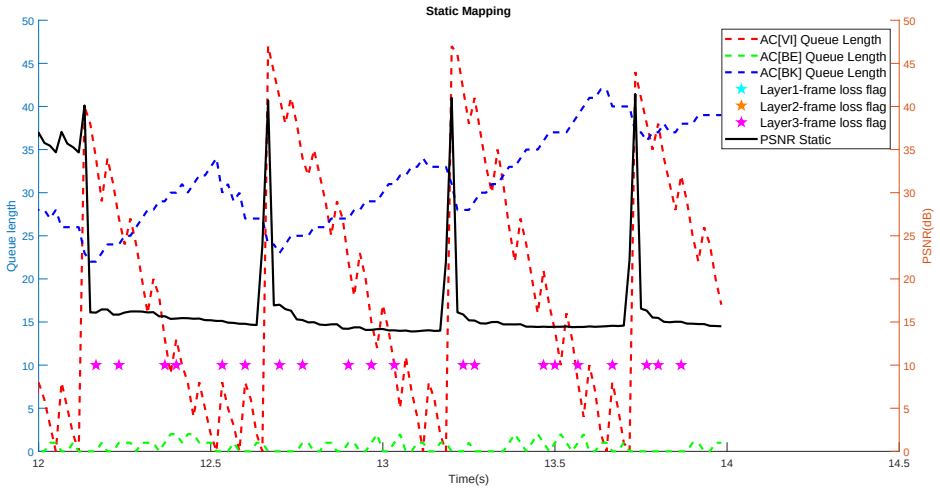


FIGURE 3.18 – Algorithme d'acheminement statique : état de remplissage de la file d'attente, qualité vidéo PSNR et indication des images perdues au fil du temps.

Les valeurs des pics PSNR de la Figure 3.18 sont dues à la bonne réception des paquets de trames IDR (couche 1). Néanmoins, la transmission de paquets vidéo à travers la file d'attente

en arrière-plan génère des pertes d'image dues au retard de réception du paquet, en particulier dans les applications à faible latence. Nous constatons également que les files d'attente les plus prioritaires ne sont pas complètement exploitées, contrairement à la méthode adaptative illustrée à la figure 3.19. En effet, les files d'attente remplissant la méthode adaptative sont mieux adaptées, ce qui réduit le nombre de paquets perdus. Cela explique également les bonnes valeurs PSNR. Une détérioration de la qualité du canal a provoqué un retard important à la réception. Cela conduit à la perte de quatre images consécutives de couches différentes. Ainsi, la perte d'une image de la couche 1 affecte le PSNR pendant tout le GOP.

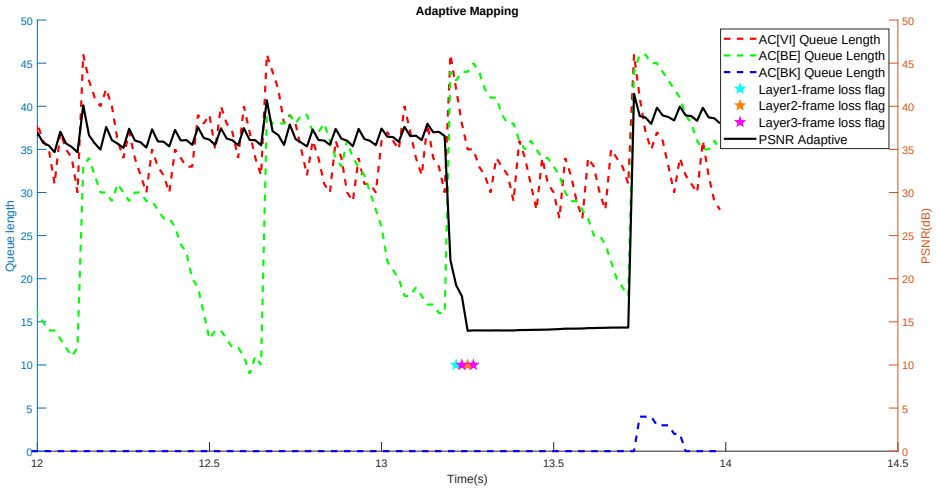


FIGURE 3.19 – Algorithme d'acheminement adaptatif : état de remplissage de la file d'attente, qualité vidéo PSNR et indication des paquets d'images au fil du temps.

L'efficacité des différents algorithmes d'acheminement dans une transmission multi-flux

En réalité, le flux vidéo coexiste généralement avec d'autres types de flux. Cela provoque une charge du réseau et provoque également le remplissage des AC VO, BE et BK. Dans ce cas, l'accès de la trame d'une donnée vidéo au support est plus disputé. De plus, pour nos méthodes, lorsque des paquets vidéo sont acheminés sur des files d'attente de priorité inférieure, les paquets vidéo partagent ces ressources avec les paquets dédiés. Afin d'étudier l'efficacité des algorithmes d'acheminement, nous avons simulé la transmission vidéo dans notre deuxième scénario (environnement autoroutier + multi-flux). Les résultats sont présentés dans le Tableau 3.7, plusieurs conclusions peuvent être tirées sur différents aspects de la chaîne de transmission :

— **Effet de la séquence vidéo :** pour un même débit d'encodage entre les différentes séquences, la qualité de codage des différentes séquences est évidemment différente. Cela est dû à la fois aux caractéristiques et à la fréquence d'images de chaque séquence. Par exemple, la différence entre le codage des séquences Partyscene et BasketballDrill entraîne une différence PSNR moyenne de 5.62 dB pour les 3 configurations. Comme la fréquence d'image est la même (50 IPS), la différence est due aux caractéristiques spatio-temporelles spécifiques à chaque séquence.

— **Configuration de l'encodage vidéo :** nous vérifions que le codage au même débit binaire avec la configuration AI entraîne logiquement une qualité vidéo inférieure à celle des

deux autres modes de codage. Les configurations RA et LD-B ont une qualité vidéo assez similaire avec un léger avantage pour la RA qui est due aux images de référence avant et arrière de la structure de prédiction RA.

— **Algorithme d'acheminement :** pour toutes les séquences vidéo, nous vérifions une amélioration du nombre de paquets reçus en fonction de l'efficacité de la méthode d'acheminement. Une comparaison permet d'évaluer un gain de paquet reçu moyen de 4% entre l'algorithme EDCA et la méthode statique. Alors que la solution adaptative apporte un gain moyen de 13% par rapport à la solution statique. Cela se reflète également dans la qualité vidéo à la réception, la solution statique amène un gain PSNR moyen de 1.21 dB par rapport à l'algorithme EDCA. Alors que la solution adaptative a un gain de PSNR moyen de 8.74 dB par rapport à la solution statique [57].

Séquence Vidéo	Structure d'encodage	Algorithme d'acheminement	PSNR d'encodage (dB)	PSNR de transmission (dB)	Paquets transmis	Paquets reçus
RaceHorses (30fps) 832×480 (class C) 300 Images	AI	EDCA	30.18	21.6	2097	1700
		Statique		21.6		1700
		Adaptatif		30.18		2097
	LD	EDCA	34.23	18.99	2010	1707
		Statique		20.73		1763
		Adaptatif		32.38		1994
	RA	EDCA	34.4	20.96	2011	1669
		Statique		21.4		1677
		Adaptatif		33.8		1949
PartyScene (50fps) 832×480 (class C) 500 Images	AI	EDCA	23.32	22.72	2000	1664
		Statique		22.72		1664
		Adaptatif		23.32		2000
	LD	EDCA	30.58	19.41	2226	1754
		Statique		20.73		1874
		Adaptatif		30.25		2126
	RA	EDCA	31.27	21.15	2233	1712
		Statique		20.84		1778
		Adaptatif		29.63		2053
BasketballDrill (50fps) 832×480 (class C) 500 Images	AI	EDCA	29.1	26.4	2000	1693
		Statique		26.4		1693
		Adaptatif		29.1		2000
	LD	EDCA	36.28	21.49	2082	1709
		Statique		21.87		1877
		Adaptatif		35.41		2081
	RA	EDCA	36.67	20.88	2069	1700
		Statique		29.83		1915
		Adaptatif		35.03		2057
BQMall (60fps) 832×480 (class C) 600 Images	AI	EDCA	27.7	21.04	2399	1753
		Statique		21.04		1753
		Adaptatif		26.9		2392
	LD	EDCA	35.92	18.72	2169	1768
		Statique		19.8		1956
		Adaptatif		34.17		2169
	RA	EDCA	36.47	20.01	2203	1770
		Statique		20.95		1960
		Adaptatif		31.07		2174

Tableau 3.7 – PSNR moyen et nombre de paquets perdus pour chaque simulation.

3.4.6 Estimation du délai bout en bout pour les différentes structures d'encodage

Compte tenu de l'importance des transmissions à faible latence dans le contexte des réseaux véhiculaires, nous nous sommes également intéressés à une évaluation des délais de nos différents systèmes. Il est clair que le schéma de codage AI offre la complexité d'encodage la plus faible. Ceci est dû au fait qu'aucune estimation/compensation de mouvement n'est appliquée. Il est ainsi le mieux adapté aux contraintes de faible latence.

Malheureusement, cela se fait au détriment de la distorsion d'encodage en raison de l'efficacité limitée du codage de la structure AI. Les deux autres configurations sont de meilleure qualité mais avec une latence supérieure. Les équations suivantes [51] sont définies pour le calcul du délai de bout en bout, respectivement pour la configuration du codage LD et RA :

$$t_{low-delay} = t_{en-LD} + t_{net} + t_{dec-LD} \tag{3.4}$$

$$t_{Random-Access-gop} = (gop-1) \times t_{fr} + (\log_2(gop)+1) \times t_{en-RA} + t_{net} + t_{dec-RA} \tag{3.5}$$

Où :

— t_{net} est le délai de transmission/propagation, c'est-à-dire le temps de transmission entre l'émetteur et le récepteur dans un système ou une architecture de réseau, il provient de plusieurs sources, notamment le temps de propagation et le délai de mise en file d'attente.
— t_{en} le temps nécessaire pour l'encodage d'une image,
— t_{dec} le temps nécessaire pour le décodage d'une image.

La taille de GOP est définie comme *gop* et t_{fr} est l'intervalle de temps entre les images successives où t_{fr} est $1/fps$. Pour estimer les temps de codage HEVC pour les configurations AI, RA et LD-B, un PC personnel Intel Core i5-3210M 2.5 GHz avec 6 Go de RAM a été utilisé. Les ressources de calcul étaient uniquement dédiées au processus de codage. Cependant, cela produit des temps de codage importants. Nous supposons que les véhicules ont la possibilité de disposer de codeurs embarqués plus puissants que le PC utilisé, et que le traitement parallèle réduira le temps de calcul.

De plus, pour garantir la contrainte du temps réel, il est évident que le temps nécessaire à l'encodage d'une image doit être inférieur à celui de la fréquence d'image et doit satisfaire $t_{\text{en}} < t_{\text{fr}}$ pour chaque image [15]. Des expériences de simulation ont montré que la configuration LD-B nécessite un temps d'encodage supérieur à celui des autres configurations. En effet, selon nos propres simulations, les configurations RA et AI sont respectivement 23% et 72% plus rapides que le LD-B. On atteint pratiquement les mêmes scores si les temps de codage de [51] et [11] sont considérés.

Le temps d'encodage que délivre la machine utilisée est bien évidemment trop important et ne permet pas de respecter les conditions de faible latence et dans le but d'évaluer le délai de bout en bout des différentes structures d'encodage. Nous faisons varier le temps de codage t_{en} de $t_0 = 2 \times 10^{-3}$ à t_{fr} (s). Le temps d'encodage des différentes configurations n'étant pas le même, nous appliquons également un coefficient représentant la différence du temps de calcul (précédemment décrit). Par exemple, si nous prenons le cas de la séquence BQmall qui pour rappel présente une fréquence d'image de 60 IPS. Nous faisons varier $t_{\text{en_LD}}$ de t_0 à (1/60) s. La structure RA étant 23% plus rapide que LD, nous appliquons à $t_{\text{en_RA}}$ un coefficient, α=1-0.23, afin de répercuter la différence du temps d'encodage sur le délai bout en bout dans 3.4 et 3.5. Ainsi, $t_{\text{en_RA}}$ varie de $\alpha \times t_0$ à $\alpha \times (1/60)$ s. De plus, l'outil d'évaluation "Evalvid" fournit une valeur estimée de t_{net}. Ainsi, l'évaluation du délai bout en bout des différentes structures montrent que le $t_{\text{low_delay}}$ est 65% plus rapide que le $t_{\text{random_access}}$. L'influence de la taille du GOP est indéniable. Sachant que la configuration de la structure RA du HEVC est passée d'un GOP de

16 à un GOP de 32 dans la version HM.16.16 utilisé dans cette étude. Cette modification exclut l'utilisation de RA dans une application à faible retard. Une taille de GOP plus petite pourrait permettre l'utilisation de la RA dans un contexte de faible latence, comme établi par [51].

3.5 Conclusion

Dans de ce troisième chapitre nous avons présenté un mécanisme d'amélioration de la transmission vidéo dans les réseaux véhiculaires basé sur une solution inter-couches qui tient compte de la structure temporelle du flux vidéo à l'encodage et à l'acheminement des trames au niveau de la couche MAC. L'algorithme adaptatif mis en place permet une amélioration de la diffusion du flux HEVC sous contrainte de faible latence sur les réseaux de véhicules avec la norme IEEE 802.11p. En effet, les informations sur la structure vidéo de prédiction temporelle, le type de trame et l'état de remplissage de la couche MAC permettent à l'algorithme de délivrer de manière optimale les paquets vidéo.

Plusieurs résultats de simulation ont montré une amélioration globale de la qualité bout en bout des deux solutions proposées par rapport à l'EDCA standard, pour différents scénarios. Ainsi, le gain en PSNR moyen de notre solution adaptative est supérieur à 9 dB. L'étude comparative de la QoS et de la QoE a démontré que l'algorithme adaptatif proposé fournit les meilleurs résultats pour les différentes structures de prédiction temporelle HEVC. La solution actuelle n'apporte aucune différenciation dans le traitement des trames pour un encodage avec structure temporelle AI. Par conséquent, dans le prochain chapitre nous allons envisager un meilleur traitement des paquets vidéo avec une telle transmission.

Chapitre 4

Solution inter-couche pour le streaming à faible latence basée sur un encodage à descriptions multiples

4.1 Introduction

La structure de codage tout intra (AI) garantit un temps de codage minimal bien adapté à des applications nécessitant un faible délai bout en bout. En effet, la structure AI est la plus à même de respecter les contraintes de délais. N'exploitant que la redondance spatiale, le temps d'encodage est plus faible que celui des autres structures du fait de l'absence du calcul de la prédiction de mouvement. Néanmoins cette faible complexité se concrétise aux dépens d'un débit binaire vidéo plus élevé, qui pénalise donc les performances de transmission : ce surcout de débit peut en effet entraîner une perte de paquets comparativement plus importante qui se répercute sur la qualité à la réception.

Les deux solutions présentées au chapitre précédent, ne se sont pas concentrées sur cette structure d'encodage et n'ont pas apporté d'amélioration significative à un système basé sur ce type d'encodage. A travers ce chapitre, nous détaillons une solution dédiée à la structure AI et basée sur un algorithme inter-couches original qui nous a permis d'apporter une amélioration significative à la qualité vidéo reçue dans les communications véhiculaires. L'idée repose sur le même principe que les deux solutions présentées au troisième chapitre avec l'exploitation des deux autres AC de moindre priorité. A travers cette troisième solution nous avons mis en place un système plus élaboré basé sur un encodage vidéo par descriptions multiples(MDC).

La première partie de ce chapitre établit un état de l'art dans lequel nous présentons les techniques de codage MDC existantes et nous établissons une revue des travaux existants. Dans la seconde partie, nous présentons la technique de codage MDC retenue ainsi que la solution cross-layer adoptée. Les paramètres de simulation et les résultats obtenus sont ensuite discutés. Ils montrent que les gains moyens du PSNR peuvent atteindre 7.75 dB par rapport aux systèmes de transmission vidéo classiques.

4.2 État de l'art

Dans le cas particulier de la transmission vidéo [4], il existe généralement trois types d'approches pour réduire les effets de perte de paquets :

— Au niveau du protocole de la couche transport basé sur la requête de répétition automatique fiable (ARQ), tel que le protocole de contrôle de transmission (TCP). Cependant, cette option présente l'inconvénient d'ajouter un délai important qui n'est pas acceptable pour les applications à faible latence.
— En ajoutant une correction d'erreur directe (FEC) qui augmente quantitativement le débit binaire.
— Avec un codage résilient d'erreurs (ERC), utilisé comme protection au niveau source et pouvant prendre de nombreuses formes, comme le codage à descriptions multiples (MDC).

En effet, le MDC est une approche efficace qui vise à améliorer la qualité du streaming multimédia sur les canaux à diversité de chemins ; c'est-à-dire lorsque plusieurs chemins sont disponibles entre l'expéditeur et le destinataire. Le principe de MDC est de séparer le signal source en plusieurs représentations appelées descriptions telles que :

— Chaque description peut être décodée indépendamment lors de la réception ;
— Plus le nombre de descriptions reçues est élevé, meilleure est la qualité de la vidéo reconstruite.

4.2.1 Codage à descriptions multiples

MDC peut être utilisé comme une protection au niveau source. Il contribue à assurer une transmission robuste sur les réseaux hostiles tels que les réseaux sans fil. Le principe du MDC est de fournir une résilience aux flux de données en les codant dans deux ou plusieurs flux binaires, également appelés fragments, comme le montre l'exemple de la Figure 4.1. Chacun de ces flux binaires est une description qui sera encodée indépendamment des autres. A la réception, le signal sera reconstruit à partir des descriptions reçues, ce qui garantit une meilleure qualité. En effet, le MDC réduit le taux de perte de paquets en transmettant les différentes descriptions sur plusieurs chemins disjoints.

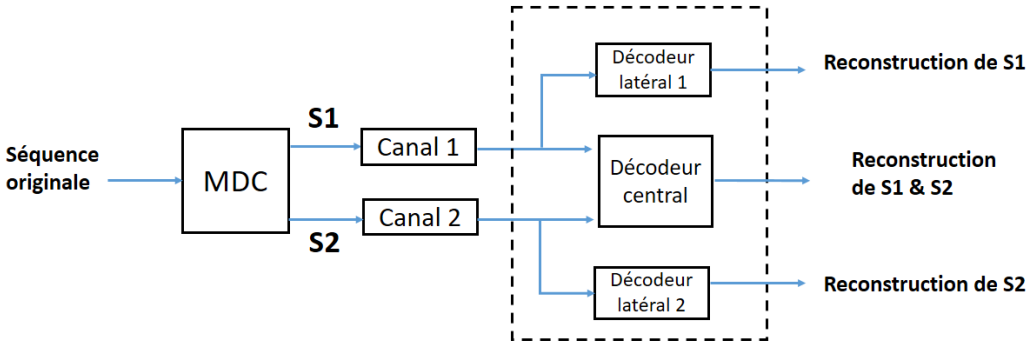


FIGURE 4.1 – Modèle MDC basique avec deux encodeurs.

Le MDC étant une solution assez pertinente pour la diffusion vidéo en continu sur les réseaux

avec perte, il a une large application dans le cas des réseaux à commutation de paquets. Malgré l'hostilité des réseaux sans fil : l'évanouissement du canal, la congestion du réseau, la variabilité de la bande passante, la capacité du réseau de base et la sélection des itinéraires. Le MDC est l'une des méthodes les plus résistantes aux erreurs qui peuvent être utilisées efficacement dans la lutte contre les erreurs en rafale dans les applications vidéo à contraintes retardées où la retransmission n'est pas réalisable.

En effet, le MDC fournit une solution peu complexe qui allège les artefacts visuels. Le but de MDC est de créer plusieurs descriptions indépendantes qui contribuent à une ou plusieurs propriétés de la vidéo : résolution temporelle ou spatiale, contenu fréquentiel, rapport signal à bruit. Les différentes descriptions peuvent avoir la même importance (schémas MDC équilibrés) ou avoir une importance différente (schémas MDC non équilibrés) [95]. Le MDC aborde le problème de l'encodage d'une source pour la transmission sur un système de communication à plusieurs canaux. Dans la mise en œuvre la plus courante, à deux descriptions générées, celles-ci ont un même débit et une même importance, de sorte que chaque description à elle seule fournit une qualité acceptable et que les deux descriptions ensemble permettent d'obtenir une meilleure qualité. La mise en paquets et l'envoi des deux descriptions se font individuellement via les mêmes canaux physiques ou de canaux distincts. Les schémas MDC peuvent être classés comme suit : Odd-Even frames, Redundant Slices, Spatial MDC and Scalar Quantizer MDC [48].

En raison de leur simplicité de production de flux multiples, les techniques paire/impaire sont particulièrement attrayantes pour les applications interactives en temps réel. Fondamentalement, le schéma MDC basé sur des images paires/impaires divise le flux vidéo en deux flux, le premier constitué des images paires et le second des images impaires, appelées ici, respectivement description 1 et description 2. Ce schéma permet d'éviter plus facilement toute discordance au détriment de l'efficacité du codage. En effet, par rapport aux encodeurs vidéo standards, la redondance qui provient de la distance de prédiction temporelle est plus longue.

4.2.2 Travaux connexes

Le MDC est l'une des principales méthodes de codage robustes et résistantes aux erreurs qui peuvent être utilisées dans la protection contre les erreurs. Particulièrement dans les applications vidéo nécessitant une faible latence où la retransmission n'est pas possible [34, 95]. Cette solution a fait ses preuves sur différents réseaux avec des conditions sévères et un taux élevé de perte de paquets, comme le montre Kazemi et. Al. [48]. Leur article de synthèse détaille également les différents systèmes MDC existants. L'une des alternatives à MDC est l'évolutivité avec l'extension H.264 appelée SVC (scalable video coding) ou l'extension HEVC appelée scalable HEVC (SHVC) [1, 17]. SVC ou SHVC décompose le signal vidéo en plusieurs couches : une couche de base et une ou plusieurs couches d'amélioration supplémentaires. Cependant, dans ce cas, il est obligatoire de recevoir la couche de base afin de décoder un signal vidéo de qualité minimale ou de meilleure qualité en adjoignant un ou plusieurs flux d'amélioration.

Dans la littérature, il existe une tendance récente à utiliser le MDC dans les applications de streaming vidéo mobile [17]. Qadri et al. [75], ont considéré le MDC dans le streaming vidéo multi-source dans les VANET. Pour ce faire, ils ont utilisé la décomposition spatiale avec l'ordre de macrobloc flexible (FMO) du damier, une technique de l'encodeur H.264 / AVC de résilience aux erreurs. Dans [24, 25], dans une application aux transports ferroviaires, les auteurs associent le MDC basé sur H.264 / AVC à la transmission MIMO (Multiple Input Multiple Output) en utilisant plusieurs antennes pour améliorer la transmission des trains dans les tunnels.

Bernardini et al. [8] ont proposé une approche statique inter-couches basée sur un flux vidéo H.264 avec un schéma MDC. Alors que Miliani et al. [64] ont établi une stratégie de classification adaptative qui se base sur le pourcentage de coefficients DCT quantifiés nuls pour

les paquets codés MDC en tirant parti de la différenciation QoS fournie par la norme IEEE 802.11e. Néanmoins, les différents travaux listés ne tiennent pas compte de l'état du canal et ne concernent pas particulièrement la norme IEEE 802.11p. De plus, à nouveau, aucune contrainte de latence n'est prise en compte.

4.3 Solution 3 : Schéma inter-couche adaptatif pour la diffusion vidéo en continu encodée à faible latence en descriptions multiples

4.3.1 Description du système proposé

Dans le système adaptatif à faible complexité proposé, l'encodage MDC pairs-impairs est utilisé dans les VANET. Comme l'illustre la Figure 4.2, le schéma inter-couches adopté exploite le flux de paquets vidéo des deux descriptions dans l'algorithme d'acheminement au niveau de la couche MAC IEEE 802.11p. Au niveau de la couche application, les images paires et impaires sont séparées en deux descriptions et envoyées à deux encodeurs AI H.265 / HEVC indépendants. Chaque encodeur génère un flux de paquets qui est envoyé aux niveaux inférieurs de la pile de protocoles.

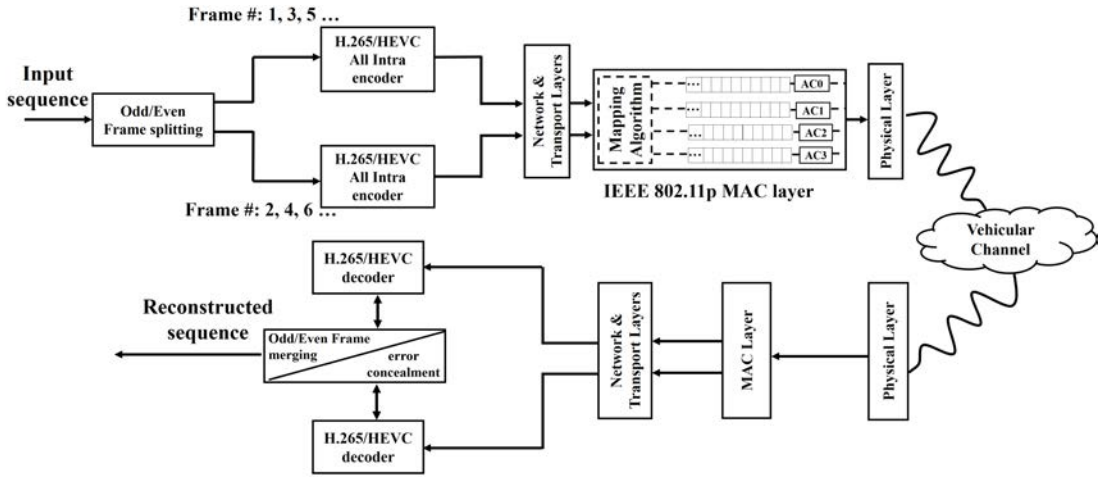


FIGURE 4.2 – Représentation du schéma de transmission MDC adopté.

Au récepteur, si les deux décodeurs H.265 / HEVC reçoivent correctement tous les paquets, les deux descriptions peuvent être décodées et la séquence codée peut être reconstruite sans perte de qualité supplémentaire. Dans le cas où certaines parties d'une description sont manquantes, la description est supprimée et un mécanisme de dissimulation d'erreur se produit en appliquant une copie d'image à partir de l'image de l'autre description, comme illustré à la Figure 4.3. Ce mécanisme nous permet d'avoir une séquence reconstruite moins dégradée. En effet, l'encodage à fréquence d'images élevée adopté permet, dans le cas d'un canal dégradé, de récupérer une séquence de bonne qualité avec une plus faible fréquence d'image. En effet, étant donné que la copie d'image est appliquée, le pire des cas étant d'avoir une fréquence d'images égale à la moitié de la fréquence d'image originale, cela garantit une qualité vidéo minimale.

L'algorithme proposé applique une discrimination de traitement aux deux descriptions.

L'objectif est de protéger une description au détriment de l'autre. Pour ce faire, comme pour les deux solutions précédemment présentées, nous proposons d'utiliser les autres AC en plus de celui utilisé par la vidéo, à savoir le *AC*[2].

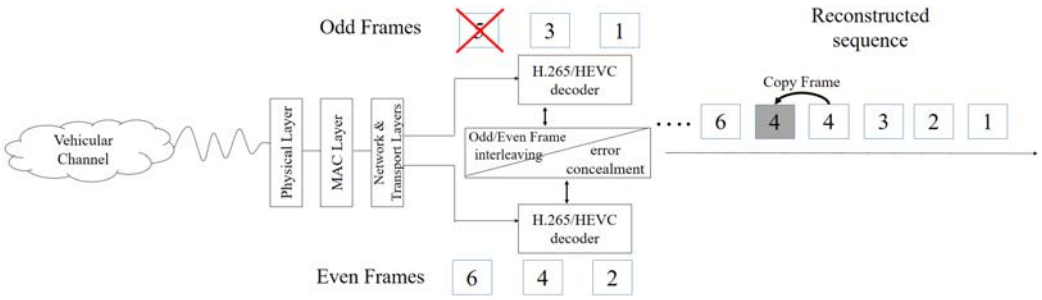


FIGURE 4.3 – Le mécanisme de dissimulation d'erreur adopté.

4.3.2 Algorithme d'acheminement statique

Dans l'algorithme d'acheminement statique utilisé pour la comparaison, nous acheminons les paquets de la description impaire sur le *AC*[2] et les paquets de la description paire sur le *AC*[1]. Cela augmente les chances de recevoir correctement la description impaire. Le principe s'inspire des travaux de Ksentini et al. [53]. La Figure 4.4 illustre l'algorithme d'acheminement statique.

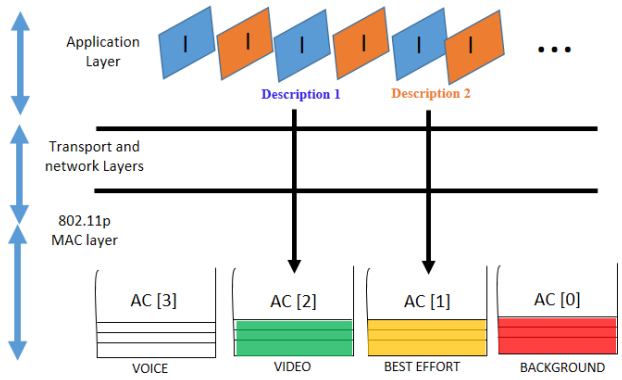


FIGURE 4.4 – Illustration de l'algorithme inter-couche statique.

4.3.3 Algorithme d'acheminement adaptatif

Pour l'algorithme d'acheminement adaptatif, sur la base des deux solutions antérieures, il alloue dynamiquement à chaque paquet vidéo le buffer le plus approprié au niveau de la couche MAC. Il prend en compte l'état de la charge de trafic du réseau et la description de chaque paquet d'image. En effet, pour différencier les deux descriptions, chaque description a une probabilité d'acheminement différente sur les AC de moindre priorité, définie comme $P_{Descrip}$. La probabilité est comprise entre 0 et 1 et dépend de l'importance de la trame alors que $P_{pair} > P_{impaire}$. Le système d'acheminement adaptatif basé sur un encodage MDC repose sur l'expression suivante :

$$P_{new} = P_{Descrip} \times \frac{qlen(AC[2]) - qth_{low}}{qth_{high} - qth_{low}} \tag{4.1}$$

où $P_{Descrip}$ est la probabilité initiale de chaque description et P_{new} est la probabilité actualisée. La Figure 4.5 illustre l'algorithme d'acheminement adaptatif. Les paramètres établis pour le système sont les suivants : la probabilité pour chaque description, $P_{Descrip}$, est fixée à 0 pour la description impaire (D1) et à 0,6 pour la description paire (D2), gardant ainsi la valeur des seuils précédemment établis. Comme les deux solutions précédentes, lorsque $qlen(AC[2])$ est inférieur à qth_{low}, tous les paquets sont acheminés vers $AC[2]$. Lorsque $qlen(AC[2])$ est compris entre qth_{high} et qth_{low}, P_{new} définit la probabilité des paquets d'être acheminés sur $AC[1]$. Et enfin, lorsque $qlen(AC[2])$ est supérieur à qth_{high}, les paquets vidéo sont acheminés dans $AC[1]$ avec $P_{Descrip}$ la probabilité d'acheminement ou d'être dirigé sur $AC[0]$.

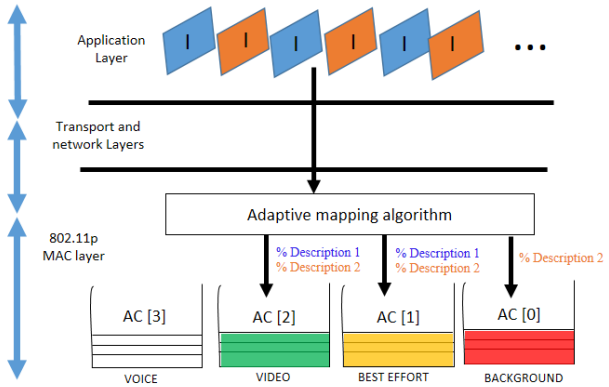


FIGURE 4.5 – Illustration de l'algorithme inter-couche adaptatif.

4.3.4 Analyse de l'efficacité de l'algorithme d'acheminement adaptatif basé sur un encodage à description multiple

Différentes simulations ont été menées afin d'évaluer l'efficacité des solutions proposées. Pour cela, nous avons choisi d'utiliser les trois séquences suivantes : PartyScene, BasketballDrill et BQMall, qui ont une fréquence d'images assez importante, respectivement de 50, 50 et 60 images par seconde. Ces trois séquences ont été diffusées dans un environnement urbain où deux scénarios ont été adopté :

— Le premier scénario : comme pour la deuxième solution, seule la vidéo est transmise sur le réseau. L'objectif est d'évaluer la qualité de la vidéo au fil du temps. Aussi, d'étudier le comportement des mécanismes à travers la gestion de l'acheminement des paquets vidéo et l'état de remplissage des différents ACs.

— Le second scénario : la vidéo coexiste avec d'autres types de flux pour simuler une situation plus réaliste. En effet, surchargeons la transmission vidéo de la transmission d'un trafic vocal à travers l'$AC[3]$ mais aussi d'un flux TCP à travers l'$AC[1]$ et d'un flux UDP sur l'$AC[0]$.

Analyse de l'état des files d'attente

Dans cette section, nous analysons les files d'attente de remplissage pour les différents mécanismes. Les Figures 4.6, 4.7 et 4.8 montrent l'état de remplissage des files d'attente et le PSNR vidéo image par image respectivement pour les algorithmes EDCA, statique et adaptatif. Pour les trois Figures, l'axe des ordonnées gauche représente le nombre de paquets au niveau du buffer et celui de droite le PSNR en dB. L'axe des abscisses représente le temps en secondes.

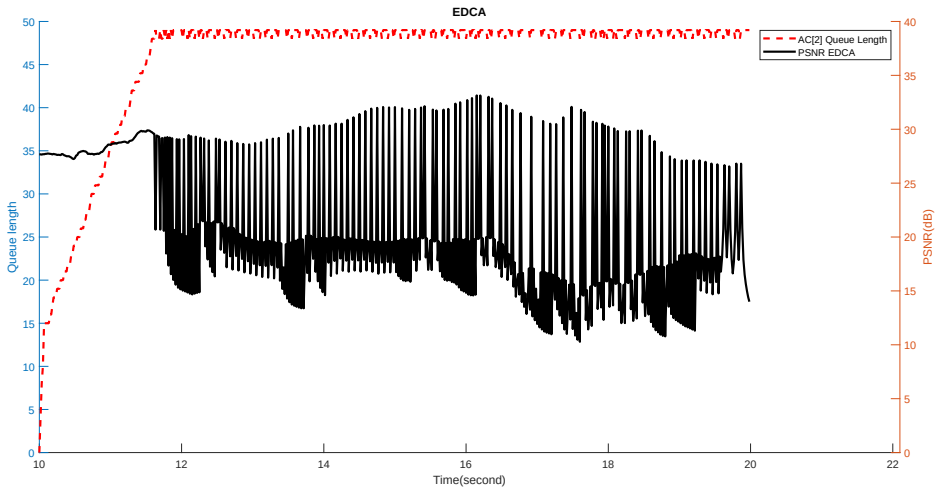


FIGURE 4.6 – Algorithme EDCA : état de remplissage de la file d'attente et le PSNR de la vidéo décodée.

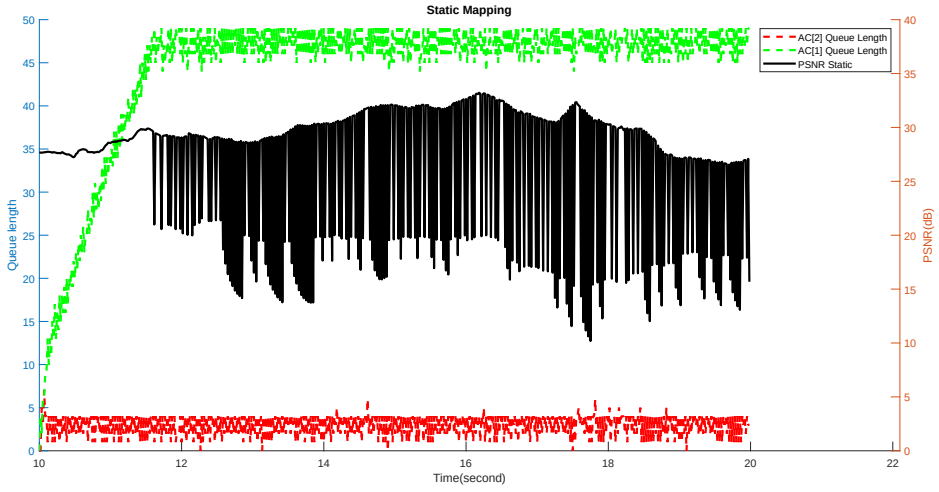


FIGURE 4.7 – Algorithme d'acheminement statique : état de remplissage de la file d'attente et le PSNR de la vidéo décodée.

Le fait que le mécanisme EDCA utilise une seule file d'attente pour transmettre la vidéo génère des pertes de paquets dans la file d'attente dès son remplissage. Cette perte de paquets a un impact direct sur la qualité de la vidéo, comme illustré sur la Figure 4.6. En outre, le mécanisme de dissimulation d'erreur appliqué permet de conserver une valeur de PSNR acceptable lorsque les modifications temporelles ne sont pas importantes. Cela s'explique par la technique de la copie d'image et la fréquence d'images élevée.

En ce qui concerne l'algorithme EDCA, l'application du MDC ne change en rien à une transmission à codage de description unique (SDC). En effet, le fait d'appliquer un codage AI signifie que chaque image est codée indépendamment du reste de la séquence. Cela se traduit donc par le même flux obtenu entre les codages SDC et MDC. Alors que les deux algorithmes proposés utilisent la spécificité du schéma MDC dans la décision d'acheminement.

La Figure 4.7 permet de voir l'amélioration apportée par la méthode statique sur la qualité vidéo représentée par le PSNR. Cela s'explique par l'utilisation d'un AC supplémentaire par rapport à la méthode EDCA. On peut néanmoins noter la sous-utilisation de l'AC avec la plus haute priorité : l'$AC[2]$. De plus, la saturation de l'$AC[1]$ pénalise complètement la description vidéo défavorisée. Ce mécanisme permet la bonne réception de l'une des deux descriptions, qui fournissent ainsi une vidéo avec $1/2$ fréquence d'images.

La Figure 4.8 quant à elle, illustre le comportement des files d'attente avec le mécanisme adaptatif, nous pouvons constater que ce mécanisme utilise pleinement les ressources mises à disposition par les différents AC et exploite les ressources par ordre de priorité. Cela se traduit par une meilleure qualité vidéo que les deux autres algorithmes. Le passage d'une file d'attente à une autre permet une utilisation optimale des ressources que met à disposition le standard IEEE 802.11p pour la transmission de la vidéo.

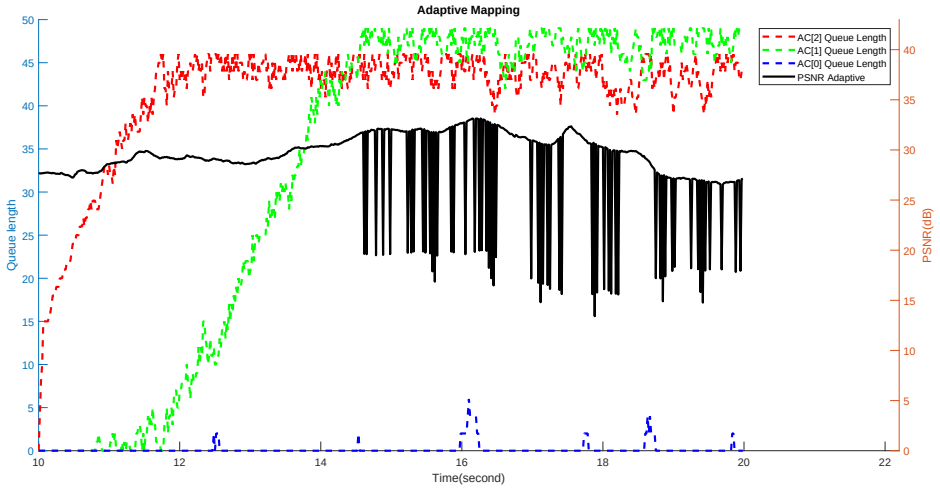


FIGURE 4.8 – Algorithme d'acheminement adaptatif : état de remplissage de la file d'attente et le PSNR de la vidéo décodée.

Le Tableau 4.1 indique l'écart type de l'EQM, le PSNR moyen et le SSIM moyen pour chaque algorithme d'acheminement. On peut voir un gain PSNR de 7.75 dB entre l'EDCA et les méthodes adaptatives. En outre, un gain de 0.2476 dans le SSIM. Enfin, la différence d'écart type de l'EQM illustre la plus faible variabilité temporelle de la méthode adaptative qui préserve la QoE. En effet, nous vérifions visuellement que, compte tenu de notre méthode, les séquences vidéo

affichées sont plus fluides et présentent des artefacts temporels moins importants, tels que le désalignement ou les images figées.

Algorithme d'acheminement	σ_{EQM}	SSIM Moyen	PSNR Moyen (dB)
EDCA	436.28	0.7021	21.95
Algorithme statique	302.07	0.8564	25.37
Algorithme adaptive	125.66	0.9497	29.71

Tableau 4.1 – Écart type MSE, PSNR moyen et SSIM moyen pour chaque algorithme d'acheminement

Transmission multi-flux

La Figure 4.9 montre le PSNR image par image de la séquence BQmall transmise avec les trois méthodes d'acheminement dans le deuxième scénario adopté. Nous remarquons une dégradation fréquente de la qualité de la vidéo transmise avec l'EDCA due à la capacité limitée du buffer vidéo.

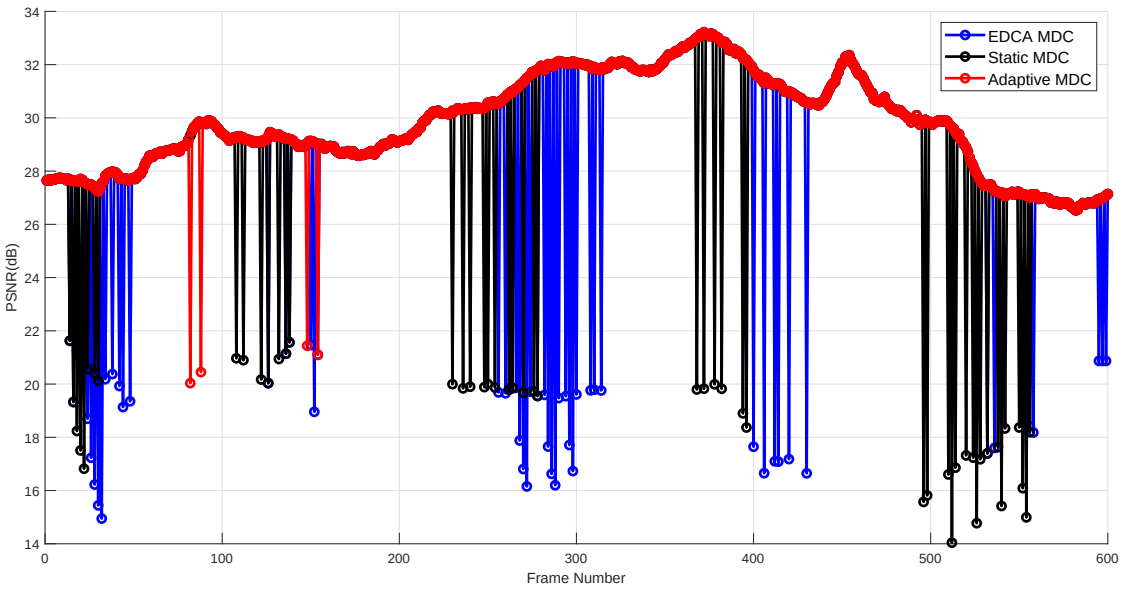


Figure 4.9 – Variation du PSNR pour les différents algorithmes d'acheminement.

Pour sa part, la méthode statique proposée utilise deux files d'attente $AC[2]$ et $AC[1]$, ce qui réduit le nombre de paquets vidéo perdus, en particulier pour les paquets vidéo de la description préférée (D1). Néanmoins, le nombre de paquets perdus de (D2) reste important. En effet, la description transmise dans l'$AC[1]$ comporte un plus grand nombre de paquets perdus. Cela est dû à la perte de paquets au niveau de la file d'attente mais également à la limitation du temps imparti pour la réception des paquets vidéo dans le cas d'une application à faible latence. Le fait que l'$AC[1]$ prenne plus de temps pour avoir accès au médium entraîne un retard conséquent sur le paquet vidéo.

D'un autre côté, la méthode adaptative utilise de manière optimale les AC du MAC 802.11p et offre ainsi une meilleure qualité que les autres systèmes. La copie d'image configurée à la réception réduit l'effet du paquet de perte. Les résultats du tableau 4.2 montrent davantage la discrimination adoptée dans l'acheminement des paquets. En effet, on peut voir l'évaluation en termes de nombre de paquets perdus et d'évaluation de la qualité vidéo avec le SSIM moyen et le PSNR moyen pour les trois méthodes d'acheminements.

Nous remarquons un gain significatif dans le nombre de paquets correctement reçus avec les deux algorithmes proposés. La méthode statique permet de mieux préserver la description la plus importante mais reste moins efficace que la méthode adaptative en termes de paquets correctement reçus et de qualité vidéo. Cela a un impact direct sur la qualité de la vidéo, comme le montrent les écarts-types PSNR, SSIM et MSE.

Les différentes simulations ont été effectuées avec différentes séquences vidéo, le gain apporté par la méthode adaptative par rapport à la méthode EDCA est en moyenne de l'ordre de 2.34 dB pour le schéma de transmission choisi. Nous pouvons établir que la méthode adaptative est encore plus efficace lorsque le canal de transmission est plus hostile. Visuellement, nous vérifions que la qualité des séquences décodées est bien moindre. Cela se traduit par une qualité d'expérience améliorée pour l'observateur final [56].

Algorithme d'acheminement	σ_{MSE}	SSIM Moyen	PSNR Moyen (dB)	Paquets transmis	Paquets perdus D1	D2	Tl
EDCA	143.81	0.9439	28.92		249	273	522
Algorithme Statique	104.63	0.9511	30.37	3600	0	95	95
Algorithme Adaptative	24.41	0.9686	32.64		2	9	11

Tableau 4.2 – Écart type de l'EQM, PSNR moyen, SSIM moyen et nombre de paquets perdus pour chaque algorithme d'acheminement

4.4 Conclusion

Dans de ce quatrième chapitre, nous avons proposé l'utilisation de solution à description multiple pour des applications présentant des contraintes de faible temps de latence sur des réseaux véhiculaires. Pour ce faire, nous avons présenté un algorithme permettant d'améliorer la transmission. En effet, les algorithmes adaptatifs proposés permettent une classification des trames basées sur le protocole IEEE 802.11p. La stratégie proposée repose sur l'acheminement des paquets vidéo dans les AC les plus appropriés afin de proposer une meilleure qualité de service. En effet, les informations sur la description vidéo et le remplissage des files d'attente au niveau de la couche MAC permettent à l'algorithme proposé de choisir la meilleure option pour l'acheminement des trames vidéo. Les résultats obtenus dans un environnement de véhicule réaliste montrent une amélioration de la qualité de service et une amélioration de la qualité de la vidéo.

Troisième partie

Amélioration de la transmission vidéo avec un système cross-layer basé sur la couche transport

Chapitre 5

Amélioration de la transmission vidéo avec un système cross-layer basé sur la couche transport

5.1 Introduction

Dans la deuxième partie du manuscrit, nous nous sommes intéressés à améliorer la gestion de la QoS en apportant des solutions au niveau de la couche MAC afin de permettre une meilleure gestion des paquets vidéos. Dans cette partie, nous nous concentrons sur le protocole de transport qui, là encore, affecte grandement la livraison des paquets et donc le streaming vidéo. En effet, la couche de transport est, avec la couche MAC, l'autre couche qui a pour but de contrôler le flux. Pendant que la couche MAC applique un contrôle de flux point à point, la couche transport le fait de bout en bout.

Lors des travaux présentés jusqu'à présent, seul le protocole UDP a été considéré. En effet, UDP reste le protocole le plus en mesure de respecter la contrainte de faible latence imposée par le streaming vidéo et les applications véhiculaires. Contrairement à d'autres types de protocoles de transport, UDP utilise un mode de transmission sans connexion. Ceci lui permet de transmettre les paquets sans tenir compte de l'état de réception des paquets assurant ainsi la latence la moins importante possible. Néanmoins ce procédé néglige complètement l'importance du flux vidéo et ne tient nullement compte de l'importance des différents paquets. A travers ce dernier chapitre, nous avons étudié l'efficacité des différents protocoles de transport pour le cas d'une transmission vidéo dans les VANETs. Comme lors de la deuxième partie, nous avons mis en place une solution cross layer, entre la couche application et la couche transport, afin d'adapter la transmission des paquets vidéos. Nous avons évalué plusieurs protocoles de transport dans la transmission au sein d'un réseau véhiculaire. Enfin, nous terminerons ce dernier chapitre avec une solution basique d'adaptation vidéo qui se base sur un protocole de transport dédié.

5.2 État de l'art

Comme précédemment établis le modèle OSI n'est pas adéquat pour les réseaux sans fils. En effet, certains protocoles ont été initialement conçus sur la base de spécificités propres aux

réseaux câblés qui reposent sur certaines hypothèses implicites de la condition du réseau. Ceci est d'autant plus vrai pour les protocoles de transport, l'exemple le plus basique est celui du TCP qui traite toutes les pertes de segment comment étant résultant d'une congestion du réseau. La raison de cette règle est que le TCP suppose que la qualité du réseau de la couche inférieure est élevée et que la probabilité de perte de paquets est faible. Ceci n'est pas le cas sur les réseaux sans fil où les pertes de paquets sont courantes et sont plus dues aux évanouissements du signal transmis, aux interférences dans la couche physique et aux collisions des données dans les autres couches du réseau.

Le TCP n'étant pas adapté aux réseaux sans fil, traitera ces pertes comme étant un encombrement du réseau et ajustera en conséquence le débit de transmission. D'un autre côté, il est connu que la plupart des logiciels multimédias sont implémentés avec le protocole HTTP (Hypertext Transfer Protocol) qui repose sur le TCP plutôt que le protocole RTP (Real-time Transport Protocol) qui repose sur l'UDP. Alors que les performances du TCP dans les réseaux sans fil limitent considérablement la possibilité de l'utilisation de telles applications. En effet, le TCP subit un niveau élevé de dégradation dans les réseaux sans fil, ce qui limite fortement le débit en comparaison à celui obtenu avec le protocole UDP. Avec le temps, plusieurs améliorations du protocole TCP ont vu le jour. Nous détaillerons dans le point suivant quelques unes d'entre elles.

5.2.1 Algorithme du protocole TCP

La fiabilité du protocole TCP repose sur un contrôle de congestion basé sur un échange périodique entre l'émetteur et le récepteur (de bout en bout). Ceci dans le but d'éviter les pertes inutiles de segments sans nuire au débit de transmission. A chaque perte de segment, le TCP retransmet le segment en cause et interprète cette perte comme résultant d'une congestion qu'il corrige en appliquant une réduction de débit.

Notons également que le TCP considère également comme perdu le segment dont l'arrivée est tardive [42, 47]. En effet, le TCP enclenche un calculateur de temps à chaque émission d'un segment si un ACK n'est pas reçu avant le temps limite de retransmission, le segment émis est considéré comme perdu. Différentes variantes du TCP existent mais toutes reposent sur les techniques/procédures suivantes :

— Démarrage lent
— Evitement de la congestion
— Retransmission rapide
— Récupération rapide

Démarrage lent (Slow Start)

Au début de chaque transmission avec le protocole TCP la procédure de démarrage lent se met en place. L'objectif est de sonder les conditions initiales du réseau qui sont inconnues au début de la transmission. Pour ce faire, le démarrage lent agit sur la taille de la fenêtre de congestion (cwnd) qui est un contrôle du flux imposé par le transmetteur. En effet, au tout début la taille du cwnd est égale à 1 MSS (Maximum Segment Size) [28]. Par la suite, à chaque acquittement (ACK) la taille du cwnd est doublée. Ainsi, la croissance de la fenêtre est exponentielle. Le TCP applique ce procédé jusqu'à atteindre un seuil arbitrairement choisi appelé ssthresh (slow start threshold). En effet, une fois le ssthresh dépassé le TCP passe du démarrage lent à l'algorithme/procédure/technique d'évitement de la congestion.

Evitement de la congestion (Congestion avoidance)

L'évitement de la congestion est la deuxième phase du protocole qui a pour but de réduire la croissance exponentielle du flux et tacher d'éviter la saturation (congestion) du réseau. Dans cette phase la taille du cwnd augmente par 1 MSS à chaque ACK. Une fois le premier segment perdu, le TCP déduit que c'est la valeur maximale du cwnd supportée par le réseau. Dans ce cas, il entre dans une troisième phase où chaque protocole TCP possède sa propre procédure.

Retransmission rapide

L'algorithme de retransmission rapide repose sur la réception d'ACKs dupliqués/dupliquées. Ceci lui permet de détecter plus rapidement les pertes de paquets et ainsi de les retransmettre sans attente. En effet, cette retransmission rapide considère qu'un paquet est perdu dès la réception de trois ACKs dupliqués, 4 ACKs identiques, par la source. L'arrivée des paquets au récepteur en désordre (différente de l'ordre d'émission) pouvant avoir lieu, le choix a été fait d'attendre 3 ACKs avant de considérer le paquet comme perdu.

Récupération rapide

Cet algorithme a été mis en place afin de limiter la réduction brutale du débit. Ainsi, avec la récupération rapide :

— Le seuil sera établi à la moitié du dernier cwnd.
— La cwnd sera égale au nouveau seuil + 3. Le 3 représente le nombre d'ACKs dupliqués.
— L'émetteur retransmet le paquet manquant sachant que le destinataire met en cache les paquets arrivés en désordre.

Ainsi, la récupération rapide permet de reprendre la transmission des paquets non encore transmis sans avoir à retransmettre des paquets déjà transmis et correctement reçus par le récepteur.

5.2.2 Les Variantes du protocole TCP

Dans cette sous-section, nous allons présenter quelques protocoles TCP et leurs différentes spécificités.

1. **TCP Tahoe**
   TCP Tahoe est la première version des différents protocoles TCP. C'est la première à avoir été implémentée et à avoir connu un succès plus ou moins important. Comme de nombreuses versions du protocole TCP, TCP Tahoe repose sur un système de fenêtrage et utilise donc la CWND. Le TCP Tahoe repose sur deux des algorithmes décrits précédemment que sont : le démarrage lent et l'évitement de la congestion. Comme autres versions TCP présentées, le TCP Tahoe repose sur l'algorithme de démarrage lent en début de transmission pour repasser en évitement de congestion dès que le seuil « threshold » est atteint. Cet état perdure jusqu'à la perte du premier segment. Ceci a pour conséquence un retour vers l'état de démarrage lent et un retour de la CWND à 1. Ce procédé particulier à TCP Tahoe est particulièrement handicapant pour les transmissions sans fil.
2. **TCP Reno**
   Deux ans après la parution du TCP Tahoe, son auteur y a apporté une révision importante en introduisant les deux autres mécanismes précédemment décrits, la retransmission rapide et la récupération rapide. Ce nouveau protocole porte le nom de TCP Reno. L'inconvénient de ce protocole est dans le cas de pertes multiples qui provoquent une

réduction assez rapide de la CWND. La solution est venue dans le protocole ultérieur appelé TCP New-Reno.

3. **TCP New-Reno**

   Le TCP New-Reno a apporté une solution au cas des pertes multiples à travers l'introduction du concept « d'épisodes de congestion ». Ainsi dans le cas des pertes multiples un acquittement partiel est considéré qui permet d'acquitter une partie des données sans que l'intégralité de la fenêtre ait été reçue. Ainsi, l'émetteur retransmettra uniquement la partie perdue. De plus, dans ce protocole, CWND est divisée qu'une seule fois pour chaque « épisode de congestion ». De nos jours, TCP New-Reno reste le protocole le plus utilisé par les systèmes [29, 23].

4. **TCP Vegas**

   Les trois protocoles précédemment présentés reposent sur un algorithme Additive Increase Multiplicative Decrease (AIMD) qui permet d'atteindre un partage équitable du débit entre les différents flots. L'inconvénient de ce type de système est la variabilité importante du débit et la perte assez conséquente de la ressource dans le cas de « fausse alarme ». Ceci est d'autant plus le cas pour les réseaux sans fil.

   Le TCP Vegas, qui a vu le jour après les trois protocoles précédemment présentés, se base sur un procédé plus élaboré d'estimation de débit assurant une variation linéaire de la taille de la CWND que ce soit pour une incrémentation ou une décrémentation. L'algorithme étant Additive Increase Additive Decrease (AIAD). Les auteurs de ce protocole ont estimé de 37% à 71% le gain en débit de ce protocole en comparaison au TCP Reno.

   Le TCP Vegas réutilise les algorithmes retransmission rapide et récupération rapide déjà utilisés dans le TCP Reno. Une modification a néanmoins été apportée pour les deux phases : démarrage lent et évitement de congestion. En effet, dans le cas du démarrage lent le doublement de la CWND se fait un RTT sur deux ce qui permet d'adoucir l'incrémentation de la CWND en comparaison au Reno. En ce qui concerne la phase d'évitement de congestion, le TCP Vegas établit une estimation sur la base du temps d'un RTT pour détecter la congestion. Cette estimation se fait selon le calcul de la différence (Diff) entre deux débits : un débit prédit et un débit réel. Avec : $Dprédis = \frac{CWND}{BaseRTT}$ et $Dréel = \frac{CWND}{RTT_d}$.

   L'algorithme se base également sur deux seuils alpha et Beta, Ainsi :

   — Si Diff < alpha, TCP Vegas incrémente CWND.
   — Si Alpha < Diff < Beta, TCP Vegas garde la même taille de CWND.
   — Et si Diff > Beta, TCP Vegas décrémente CWND.

   Ce protocole présente néanmoins une baisse de performance lors d'une cohabitation avec d'autres protocoles de transport [13].

5. **TCP Friendly Rate Control (TFRC)**

   Les protocoles précédemment décrits datent de la fin des années 80 ou du début des années 90 et sont de l'ancienne génération. De nouveaux protocoles ont vu le jour depuis dont le Datagram Congestion Control Protocol (DCCP). La principale différence, introduite par la nouvelle génération de protocole, réside dans le fait que ces protocoles sont orientés datagramme au lieu d'être orientés octets-flux comme l'est le TCP apportant ainsi une certaine continuité dans la logique de l'IP et de la couche réseau. L'autre différence majeure est l'introduction d'un nouveau mécanisme de contrôle de la congestion basé sur un calcul du taux d'envoi [39].

   Le DCCP a pour objectif de fournir un service de transport alliant l'efficacité du protocole UDP au contrôle de congestion du TCP. Pour réaliser cela, l'un des mécanismes de contrôle de congestion mis en œuvre dans le DCCP est le TCP Friendly Rate Control (TFRC). Le

TFRC est un mécanisme de contrôle de congestion pour la transmission unicast, basé sur une équation plus élaborée que celle du TCP Vegas présentée dans 5.1 [13]. Le TFRC est conçu pour être équitable lorsqu'il est en concurrence pour la bande passante avec le flux TCP. L'algorithme étant AIAD, il permet des variations de débit dans le temps bien inférieures à celles du TCP. De ce fait, il convient particulièrement aux applications multimédias telles que le streaming vidéo.

Comme indiqué précédemment, le protocole est basé sur une équation d'estimation de débit qui est définit ainsi :

$$X_{TFRC} = \frac{s}{R\sqrt{\frac{2bp}{3}} + t_{RTO}(3\sqrt{\frac{3bp}{8}})p(1+32p^2)}, \tag{5.1}$$

Où : bp est la bande passante, s est la taille moyenne des paquets de la communication, R est le temps d'aller-retour de la connexion, p est le taux de perte de paquets du chemin de réseau et le t_{RTO} est le délai de retransmission TCP.

Comme pour les protocoles TCP présentées, le TFRC établis une phase de démarrage lent dans laquelle le débit est doublé à chaque RTT. Cette phase de démarrage lent s'arrête lorsque l'expéditeur détecte une perte de paquet. Dans ce cas une décrémentation du débit est apportée sur la base de cette équation :

$$X = \min(X_{TFRC}, 2 * Receivingrate) \tag{5.2}$$

6. **Autres protocoles**

   Dans cette section nous avons décrit cinq principales variantes distinctes du TCP. D'autres variantes existes telles que : WTCP, TCP Hybla, ou TCP Westwood. Nous pouvons également citer le TCP Veno qui est une combinaison entre le protocole TCP Vegas et TCP Reno. Pour ce qui est de la nouvelle génération des protocoles de transport, nous pouvons citer : Stream Control Transmission Protocol (SCTP) qui est particulièrement intéressant pour les applications pouvant être hébergées sur plusieurs endroits à la fois.

5.3 Comparaison entre les différents protocoles de transports pour une transmission vidéo

Nous avons commencé par établir une étude comparative de l'efficacité des différents protocoles de transport dans le cadre d'une transmission vidéo V2I multi-sauts unicast sans contrainte de latence. L'étude se base dans le cas d'un scénario où seulement une vidéo est transmise dans un environnement urbain. La séquence vidéo de test choisie est la séquence BQmall. Le Tableau 5.1 illustre la qualité vidéo représentée par le PSNR pour une transmission vidéo avec différents protocoles transports.

Nous pouvons constater une variation de la qualité du flux vidéo représentée par l'évolution de la valeur du PSNR. En effet, nous pouvons constater que l'UDP apporte une meilleure qualité que le TCP même si le TCP est un protocole de transport orienté connexion et l'UDP est en mode non-connecté. Ceci s'explique par l'état de démarrage lent dont est obligé de revenir le protocole TCP Tahoe à chaque perte de paquet. Nous pouvons constater que le PSNR s'améliore en fonction du protocole TCP utilisé, ainsi le TCP-Reno apporte un gain de plus de 5 dB en comparaison au TCP Tahoe alors que TCP-newReno apporte un gain de plus de 8 dB en comparaison au TCP Tahoe. Ceci s'explique par le gain de performance des algorithmes de retransmission rapide et

de récupération rapide. Le TCP-Vegas qui se base sur un procédé d'estimation de débit assure la meilleure QoE entre les différents protocoles comparés.

Protocole de transport	PSNR moyen (dB)
UDP	27.19
TCP	24.98
TCP-Reno	30.38
TCP-New-Reno	33.08
TCP-Vegas	33.74

Tableau 5.1 – Le PSNR pour une transmission vidéo avec différents protocoles transports.

Un autre paramètre pertinent, avec la qualité, dans le cas d'une transmission en mode connecté est la gigue (jitter) et le temps global de transmission. En effet, la retransmission des paquets perdus provoque un décuplement de temps nécessaire à la transmission. Les Tableaux 5.2 et 5.3 illustrent les valeurs de la gigue moyenne et maximale de chaque protocole.

Comme pour la valeur du PSNR, nous pouvons constater une variation de la gigue. Le TCP Tahoe a les plus grandes valeurs moyenne et maximale alors que le TCP-Vegas délivre les plus petites valeurs moyenne et maximale. Au décodage de la vidéo à la réception, la variation du délai de réception des paquets influera sur l'instant de décodage de l'image correspondante ce qui engendrera des retards plus au moins important.

Protocole de transport	Jitter Moyen (s)
TCP	0.1695
TCP-Reno	0.1312
TCP-New-Reno	0.1152
TCP-Vegas	0.0239

Tableau 5.2 – Le Jitter moyen pour une transmission vidéo avec différents protocoles transports

Protocole de transport	Jitter Max (s)
TCP	2.92
TCP-Reno	0.9387
TCP-New-Reno	0.2294
TCP-Vegas	0.0678

Tableau 5.3 – Le Jitter maximal pour une transmission vidéo avec différents protocoles transports

5.4 Mécanisme d'adaptation vidéo dans les VANETs

Lors du développement de nouvelles technologies robustes, évolutives et intelligentes pour le transfert multimédia sur les réseaux IP sans fil actuels et futurs, de nombreuses préoccupations doivent être prises en compte. Aujourd'hui, un service de streaming vidéo en temps réel normal fournira au téléspectateur plusieurs choix de qualité différents sous forme de flux monodiffusions parallèles. Souvent, le serveur de diffusion en continu effectue une vérification de la bande passante de bout en bout afin de pouvoir suggérer un débit approprié pour l'utilisateur. Cette solution est d'autant plus efficace pour les réseaux présentant une variation importante de la

bande passante existante comme c'est le cas pour les réseaux VANET. En effet, la bande passante variera selon plusieurs paramètres comme la distance entre le véhicule et la RSU, la densité de véhicule, l'environnement, etc.

Dans cette dernière solution, nous avons cherché à étudier la robustesse des protocoles de transport suggérés pour la transmission vidéo adaptative en débit. Ainsi, nous proposons d'utiliser un mécanisme, basé sur le protocole de transport TFRC, d'adaptation vidéo dans les VANET.

D'autant plus que les solutions d'adaptation du contenu vidéo sont de plus en plus utilisées, notamment le streaming adaptatif dynamique sur HTTP (DASH). De plus, de nombreux mécanismes de correspondance de flux existent pour s'adapter à la non-stationnarité du canal [84]. Le concept d'adaptabilité du débit est le suivant : lorsqu'une vidéo est diffusée en temps réel d'un serveur à un client, la capacité du réseau est renvoyée au serveur en continu. Les émetteurs à adaptation de débit ajustent directement la qualité de l'encodage vidéo, offrant ainsi un débit binaire optimal et une utilisation complète du réseau à tout moment.

Lors d'une transmission, la qualité et le débit vidéo reçue peuvent changer lors de l'adaptation (en temps réel) des paramètres de codage. Ces derniers peuvent être le nombre d'images par seconde, la taille des images ou le niveau de quantification utilisé dans le processus de compression. En ce qui nous concerne, nous proposons de réutiliser le Framework open source « Evalvid-RA » [58]. Ce Framework est basé sur une adaptation de tous les GOP. Alors que la rétroaction du réseau affecte le paramètre de quantification pour ajuster la qualité et le débit de transmission [12].

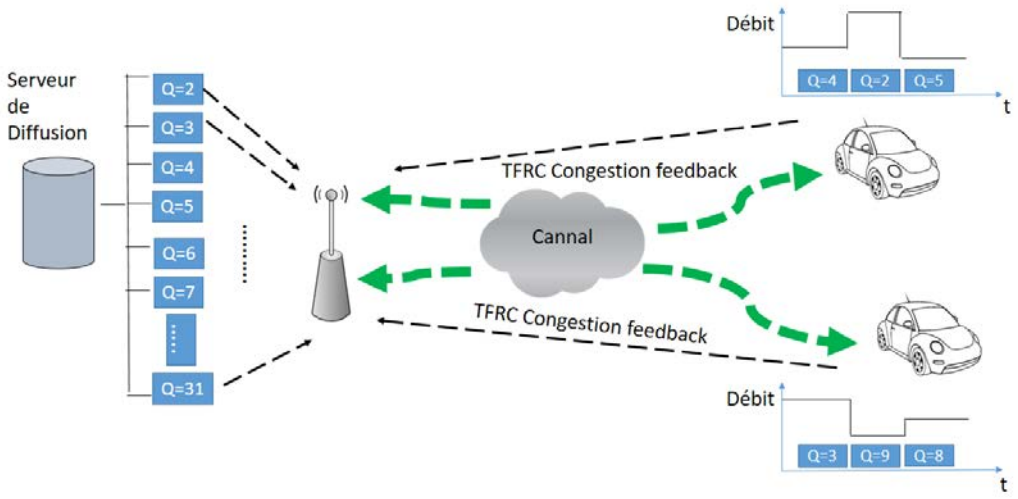


Figure 5.1 – Illustration du mécanisme d'adaptation vidéo dans les VANET proposé

Une illustration du mécanisme d'adaptation vidéo dans les VANET proposé est donné à la Figure5.1. Il montre que plusieurs qualités de compression sont disponibles sur le serveur de diffusion en continu. Celles-ci peuvent être disponibles en tant que versions pré-compressées dans la mémoire du serveur ou compressées à la volée avec un codeur temps réel prenant en charge le changement dynamique des paramètres de qualité. Pour stocker toute la gamme d'alternatives de compression avec le paramètre de quantification passant de 2 à plus de 31. Dans une implémentation réelle, une réduction du nombre d'étapes de quantification est plus probable.

Pour les tests effectués, La séquence vidéo «Sign Irene» a été codée, avec le codeur MPEG-4, avec 31 qualités vidéo différentes représentant les 31 valeurs de paramètre de quantification (QP) autorisées par le codeur. Ainsi, au niveau de l'émetteur, le serveur dispose de 31 séquences vidéo codées différentes, chacune avec son propre débit binaire et sa qualité visuelle. Les vidéos ont été encodées avec un GOP de 12 images.

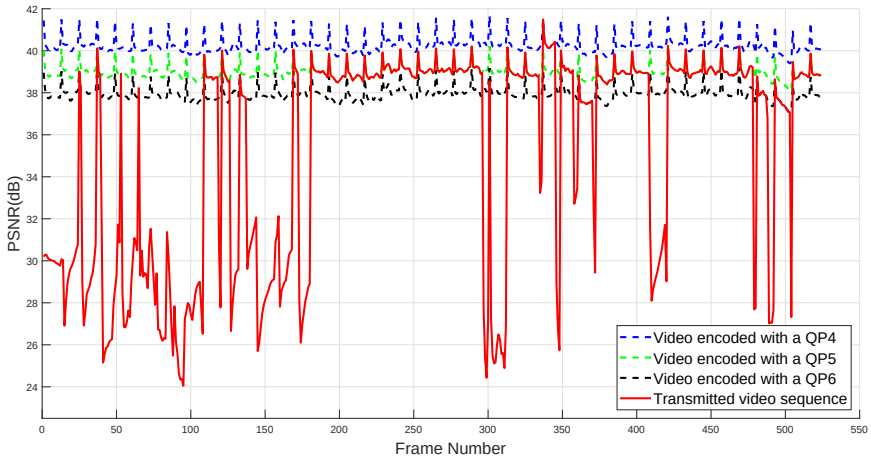


FIGURE 5.2 – Variation du PSNR pour une transmission vidéo adaptative.

La Figure 5.2 montre la variation de PSNR image par image pour une simulation de transmission vidéo adaptative sur des VANET. Quatre courbes sont affichées, dont trois pour les séquences vidéo codées avec QP : 4, 5 et 6. La courbe rouge concerne la séquence transmise, qui est superposée sur certaines parties de la courbe à l'une des trois autres courbes. Cela signifie que la transmission passe d'une qualité vidéo à une autre. De plus, la superposition de courbes signifie que la transmission a été effectuée sans perte de paquet. Le PSNR moyen de la séquence est de 35,14 dB. De plus, à l'exception des images 92-96, le reste de la séquence a un PSNR supérieur à 25 dB [54].

5.5 Conclusion

L'adaptation vidéo dans les VANET semble être une solution efficace qui permet le développement de nombreuses applications. Ainsi, un mécanisme vidéo adaptatif basé sur le protocole TFRC a été proposé qui fournit des résultats intéressants. Préalablement une comparaison entre les différents protocoles de transport pour une transmission vidéo dans les VANETs a été effectuée. Nous travaillons actuellement à l'amélioration du système adaptatif proposé, notamment en ce qui concerne la périodicité de la décision de calcul du débit, qui dépend actuellement d'un calcul à chaque début de GoP. En effet, la grande variabilité des réseaux véhiculaires nécessite une adaptation vidéo adaptée pour limiter les pertes de paquets et donc la dégradation de la qualité vidéo côté récepteur.

Conclusion et perspectives

L'objectif de ce travail de thèse a été de proposer des solutions pour l'amélioration de la transmission vidéo dans les communications véhiculaires. Nous nous sommes focalisés sur le cas de la transmission vidéo sans fils de type WIFI avec la norme IEEE 802.11p dédié aux transmissions véhiculaires. Cette dernière offre plusieurs avantages qui permettent son déploiement à grande échelle, dans le monde entier, assez rapidement. Nous pensons que c'est le meilleur choix pour déployer des applications V2X aujourd'hui mais nous croyons également à la compatibilité entre le monde WIFI et le monde cellulaire dans un avenir proche. L'approche d'un codage conjoint source-canal que nous avons retenue a ainsi pour but d'améliorer les transmissions de flux vidéo compressé dans un cadre de transmissions véhiculaires. Elle s'appuie sur des solutions cross-layer incluant des techniques de codage source (compression vidéo) et des protocoles adaptés sur différents niveaux de la chaine de transmission. Les contributions de cette thèse ainsi que leurs validations sont synthétisées par la suite.

Dans ce manuscrit, nous avons commencé par situer le contexte de nos travaux de thèse. Dans le premier chapitre, nous avons débuté par un rappel du contexte de l'étude avec le développement des normes et des systèmes de transport intelligents. Nous avons également rappelé les exigences et les applications des transmissions vidéo sur les réseaux ad-hoc véhiculaires. Nous avons présenté les bases du codage et de la transmission d'un flux vidéo numérique et les principales caractéristiques du nouveau standard de compression vidéo H.265/HEVC. Par la suite, nous avons décrit succinctement les mécanismes d'amélioration de la transmission « cross-layer » qui a été exploitée dans ce travail de thèse. Dans le deuxième chapitre nous avons poursuivi avec une présentation des outils que nous avons utilisé dans la modélisation d'une transmission vidéo dans un environnement véhiculaire. Dans ce même chapitre, nous avons évalué les performances d'une transmission vidéo dans les réseaux VANET et démontré l'importance du choix des paramètres de codage vidéo sur la qualité de la transmission vidéo dans un réseau véhiculaire.

Dans la deuxième partie du manuscrit, qui constitue le cœur de notre travail de thèse, nous avons proposé plusieurs solutions afin d'améliorer l'acheminement des trames au niveau de la couche MAC pour un streaming à faible latence. Les résultats des simulations ont montré une amélioration globale de la performance de bout en bout des solutions proposées par rapport aux solutions standards. Ainsi, une étude comparative de la QoS et de la QoE a démontré que les algorithmes proposés fournissent de meilleurs résultats pour les différentes structures de prédiction temporelle HEVC. Dans le troisième chapitre, nous avons commencé par présenter une première solution cross-layer qui prend en compte l'importance du type d'image I, P, B de la vidéo au niveau de la couche MAC pour introduire une priorisation dans l'acheminement des trames au niveau des files d'attentes de la norme véhiculaire IEEE 802.11p. La première solution dédiée uniquement à la structure temporelle low delay du standard H.265/HEVC, a été améliorée par la suite dans notre deuxième solution. En effet, dans la deuxième solution l'algorithme s'adapte au type de prédiction temporelle utilisé dans l'encodage du flux vidéo et

varie selon cette dernière afin de favoriser les trames vidéo les plus importantes et également en fonction de l'état du canal.

Dans le quatrième chapitre, nous avons proposé l'utilisation l'encodage à descriptions multiples comme solution de protection à la source afin de réduire l'effet de perte de paquets, toujours dans le cadre des applications à faible temps de latence sur des réseaux véhiculaires. Ainsi, la compression vidéo s'effectue uniquement en INTRA du fait de son faible temps d'encodage. Les résultats de la simulation montrent que les gains moyens du PSNR peuvent atteindre 7.75 dB par rapport aux systèmes de transmission vidéo classiques.

Dans le cinquième chapitre, nous avons étudié l'efficacité des différents protocoles de transport pour le cas d'une transmission vidéo dans les VANETs. Nous avons par la suite mis en place une solution cross layer, entre la couche application et la couche transport, afin d'adapter la transmission des paquets vidéos. Nous avons commencé par évaluer plusieurs protocoles de transport dans la transmission afin de déterminer l'efficacité de chacun d'entre eux dans la transmission dans les VANET. Nous avons développé une première solution simple d'adaptation vidéo qui se base sur le protocole TFRC initialement étudié. Le protocole TFRC permet d'avoir un retour sur l'état du canal grâce à un échange entre l'émetteur et le récepteur ce qui nous a servi dans la solution adaptative proposée. Néanmoins la solution proposée présente encore plusieurs limites dont la périodicité de l'adaptation de la vidéo. Nous poursuivons actuellement nos travaux afin d'améliorer le système adaptatif proposé.

Plusieurs perspectives sont envisagées à la suite de ce travail, parmi lesquelles :

— L'amélioration de l'algorithme mis en place dans l'acheminement des trames au niveau de la couche MAC sous contrainte de faible latence. En effet, avec la contrainte de délai, les paquets qui ne sont pas reçus par le récepteur dans le délai imparti ne sont pas pris en compte dans le décodage de la vidéo. De ce fait, leur transmission est inutile et ne fait que charger le réseau. Un algorithme capable de les éliminer au niveau de l'émetteur améliorera la transmission et mérite d'être pris en compte. L'algorithme doit établir une relation entre la contrainte de délai d'application, le délai de bout en bout et le temps de commutation représenté dans le remplissage des files d'attente.

— En ce qui concerne notre solution basée sur le codage à descriptions multiples, il serait intéressant d'étudier l'efficacité de schémas MDC plus complexes avec des structures de codage vidéo basées sur la prédiction vidéo temporelle,

— Il serait également intéressant de continuer à utiliser la différenciation du MDC dans le protocole de routage avec des routes adaptées à chacune des descriptions. Cela peut être fait dans un système à trois niveaux (couche réseau), en plus du système actuel à deux niveaux (couche application + couche MAC)

— L'utilisation de la scalabilité dans la transmission vidéo dans les VANETs. La scalabilité consiste à structurer le flux binaire résultant de la compression (codage) d'un objet multimédia en classes d'importance de sorte que le décodeur n'impose pas d'avoir toutes les classes à disposition lorsqu'il s'agit de reconstruire une version de l'objet multimédia compressé. Cela signifie que ces classes d'importance caractérisent et décrivent un certain niveau de précision. ''Scalabiliser" consiste donc à échelonner le contenu d'une donnée. La scalabilité a déjà murie dans d'autres applications telles que l'IPTV qui a un environnement ayant quelques similitudes avec l'environnement des VANET. En effet, les deux environnements doivent faire face aux différentes variations de la bande passante et du délai de transfert, tout en restant robustes face aux pertes de paquets et aux erreurs de transmission.

— Dans une thèse précédente soutenue au sein de L'IEMN/DOAE dans le cadre du projet ANR TOSCANE [20] l'auteur avait proposé une architecture de transcodage à complexité réduite des flux H.264/AVC afin d'adapter le débit vidéo à la bande passante du canal

de transmission. Ainsi, le transcodage permet de changer le format de compression du flux vidéo à l'entrée, modifiant éventuellement son débit, la taille de l'image ou d'autres paramètres. Il serait intéressant d'étudier l'efficacité de l'architecture de transcodage initialement proposée dans le cadre de la transmission vidéo dans les VANETs.

Production scientifique

Articles de revues internationales :

Mohamed Aymen Labiod, Mohamed Gharbi, François-Xavier Coudoux, Patrick Corlay and Noureddine Doghmane "Cross-layer scheme for low latency multiple description video streaming over Vehicular Ad-hoc NETworks (VANETs)". AEU - International Journal of Electronics and Communications. 2019 ; 104 : 23 - 34, Available from :

https ://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1434841118326827.

Mohamed Aymen Labiod, Mohamed Gharbi, François-Xavier Coudoux, Patrick Corlay and Noureddine Doghmane "Enhanced adaptive cross-layer scheme for low latency HEVC streaming over vehicular ad-hoc networks (VANETs)". Vehicular Communications. 2019 ;15 :28 – 39. Available from : http ://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214209618301864.

Communications internationales avec actes :

Mohamed Aymen Labiod, Jordan Doublet, Mohamed Gharbi, François-Xavier Coudoux, Patrick Corlay and Noureddine Doghmane "Adaptive video streaming based on TFRC protocol in vehicular ad-hoc networks (VANETs)". The 25th IEEE Symposium on Communications and Vehicular Technology (IEEE SCVT'18), 27-31 october, 2018, Ghent, November 12, 2018.

Mohamed Aymen Labiod, Mohamed Gharbi, François-Xavier Coudoux, Patrick Corlay and Noureddine Doghmane "Cross-layer approach dedicated to HEVC low delay temporal prediction structure streaming over VANETs ". The 7th IEEE International Conference on Smart Communications in Network Technologies (SACONET'18), El Oued, October 27-31, 2018.

Mohamed Aymen Labiod, Mohamed Gharbi, Patrick Corlay, François-Xavier Coudoux and Noureddine Doghmane ''Study of the effects of video encoding in a video transmission over vehicular ad-hoc networks (VANET)". 2nd International Conference on Automatic control, Telecommunication and Signals (ICATS'17), Annaba, December 11-12, 2017.

Communications sans actes :

Mohamed Aymen Labiod, Mohamed Gharbi, Patrick Corlay, François-Xavier Coudoux and Noureddine Doghmane ''Schéma inter-couches adaptatif pour le streaming HEVC à faible latence sur les réseaux ad-hoc véhiculaires (VANET)". Mardi des chercheurs, Arenberg créative mine 27 Mars 2018.

Mohamed Aymen Labiod, Mohamed Gharbi, Patrick Corlay, François-Xavier Coudoux and Noureddine Doghmane ''Cross-layer adaptive video streaming over vehicular ad-hoc networks

(VANETs)". Journées 'Véhicule autonome – transport intelligent' du club EEA, Valenciennes 9-10 novembre 2017.

Bibliographie

[1] Kondoz Ahmet. *Scalable Video Coding*. Wiley-Blackwell, 2009. isbn : 978-0-470-74064-4. doi : 10.1002/9780470740644.ch3. url : https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9780470740644.ch3 (visité le 27/08/2018).

[2] Saif Al-Sultan et al. « A Comprehensive Survey on Vehicular Ad Hoc Network ». In : *J. Netw. Comput. Appl.* 37 (jan. 2014), p. 380–392. issn : 1084-8045. doi : 10.1016/j.jnca.2013.02.036. url : http://dx.doi.org/10.1016/j.jnca.2013.02.036 (visité le 30/09/2018).

[3] R. Alieiev, A. Kwoczek et T. Hehn. « Automotive requirements for future mobile networks ». In : *2015 IEEE MTT-S International Conference on Microwaves for Intelligent Mobility (ICMIM)*. Avr. 2015, p. 1–4. doi : 10.1109/ICMIM.2015.7117947.

[4] Huihui Bai et al. *Distributed Multiple Description Coding : Principles, Algorithms and Systems*. London : Springer-Verlag, 2011. isbn : 978-1-4471-2247-0. url : //www.springer.com/us/book/9781447122470 (visité le 26/08/2018).

[5] B. Bellalta et al. « Performance Evaluation of IEEE 802.11p-Enabled Vehicular Video Surveillance System ». In : *IEEE Communications Letters* 18.4 (2014), p. 708–711. issn : 1089-7798. doi : 10.1109/LCOMM.2014.022514.140206.

[6] E. Belyaev, S. Moreschini et A. Vinel. « Uncoordinated multi-user video streaming in VANETs using Skype ». In : *2017 IEEE 22nd International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)*. 2017 IEEE 22nd International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD). Juin 2017, p. 1–3. doi : 10.1109/CAMAD.2017.8031626.

[7] E. Belyaev et al. « The Use of Automotive Radars in Video-Based Overtaking Assistance Applications ». In : *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 14.3 (2013), p. 1035–1042. issn : 1524-9050. doi : 10.1109/TITS.2013.2248731.

[8] R. Bernardini et al. « Real-Time Multiple Description Video Streaming over QoS-Based Wireless Networks ». In : *2007 IEEE International Conference on Image Processing*. T. 4. Sept. 2007, p. IV–245–IV –248.

[9] G. Bjøntegaard. *Calculation of Average PSNR Differences Between RD*. document VCEG-M33 ITU-T SG 16/Q 6. Austin, TX, 2001.

[10] M. J. Booysen, S. Zeadally et G. J. van Rooyen. « Survey of media access control protocols for vehicular ad hoc networks ». In : *IET Communications* 5.11 (juil. 2011), p. 1619–1631. url : 10.1049/iet-com.2011.0085.

[11] F. Bossen et al. « HEVC Complexity and Implementation Analysis ». In : *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology* 22.12 (déc. 2012), p. 1685–1696. issn : 1051-8215. doi : 10.1109/TCSVT.2012.2221255.

[12] Christos Bouras et al. « The TFRC Protocol and Its Usage for Wireless Video Transmission ». In : *Advanced Communication Protocol Technologies : Solutions, Methods, and Applications* (2011), p. 300–317. DOI : 10.4018/978-1-60960-732-6.ch014. URL : https://www.igi-global.com/chapter/tfrc-protocol-its-usage-wireless/54621 (visité le 02/09/2018).

[13] L. S. Brakmo et L. L. Peterson. « TCP Vegas : end to end congestion avoidance on a global Internet ». In : *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 13.8 (1995), p. 1465–1480. ISSN : 0733-8716. DOI : 10.1109/49.464716.

[14] Claudia Campolo, Antonella Molinaro et Riccardo Scopigno. « From today's VANETs to tomorrow's planning and the bets for the day after ». In : *Vehicular Communications* 2.3 (juil. 2015), p. 158–171. ISSN : 2214-2096. DOI : 10.1016/j.vehcom.2015.06.002. URL : http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214209615000418 (visité le 14/08/2018).

[15] Q. Chen et D. Wu. « Delay-Rate-Distortion Model for Real-Time Video Communication ». In : *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology* 25.8 (août 2015), p. 1376–1394. URL : 10.1109/TCSVT.2015.2389391.

[16] Qi Chen et al. « Overhaul of Ieee 802.11 Modeling and Simulation in Ns-2 ». In : *Proceedings of the 10th ACM Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Wireless and Mobile Systems*. MSWiM '07. ACM, 2007, p. 159–168. ISBN : 978-1-59593-851-0. DOI : 10.1145/1298126.1298155. URL : http://doi.acm.org/10.1145/1298126.1298155 (visité le 29/09/2018).

[17] Y. Chiang, P. Huang et H. H. Chen. « SVC or MDC ? That's the question ». In : *2011 9th IEEE Symposium on Embedded Systems for Real-Time Multimedia*. Oct. 2011, p. 76–82. DOI : 10.1109/ESTIMedia.2011.6088528.

[18] « Cisco Visual Networking Index : Forecast and Methodology, 2016–2021 ». In : (2017), p. 17.

[19] Graham Cookson. « INRIX Global Traffic Scorecard ». In : (), p. 44.

[20] Christophe Deknudt. « Mise en oeuvre d'architectures de transcodage vidéo H. 264/AVC et SVC : application à la transmission optimisée de la vidéo haute définition ». thesis. Valenciennes, 1er jan. 2011. URL : http://www.theses.fr/2011VALE0012 (visité le 12/05/2019).

[21] *ECOSOC Interegration segent 2014, sustainable urbanization.* URL : http://www.un.org/en/ecosoc/integration/pdf/fact_sheet.pdf.

[22] Elias C. Eze et al. « Advances in vehicular ad-hoc networks (VANETs) : Challenges and road-map for future development ». In : *International Journal of Automation and Computing* 13.1 (fév. 2016), p. 1–18. ISSN : 1751-8520. DOI : 10.1007/s11633-015-0913-y. URL : https://doi.org/10.1007/s11633-015-0913-y (visité le 30/08/2018).

[23] Kevin Fall et Sally Floyd. « Simulation-based Comparisons of Tahoe, Reno and SACK TCP ». In : *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.* 26.3 (juil. 1996), p. 5–21. ISSN : 0146-4833. DOI : 10.1145/235160.235162. URL : http://doi.acm.org/10.1145/235160.235162 (visité le 16/05/2019).

[24] Imade Fahd Eddine Fatani et al. « Multiple Description Coding and Scalable Video Coding Combined with Multiple Input Multiple Output Techniques : Two Strategies to Enhance Train to Wayside Video Transmissions in Tunnels ». In : *Communication Technologies for Vehicles*. Sous la dir. de Thomas Strang et al. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg, 2011, p. 83–94. ISBN : 978-3-642-19786-4.

[25] Imade Fahd Eddine Fatani et al. « Robust train-to-wayside video communications in tunnels using H.264 error-resilient video encoding combined with multiple antenna systems ». In : *Transportation Research Part C : Emerging Technologies* 25 (déc. 2012), p. 168–180. ISSN : 0968-090X. DOI : 10.1016/j.trc.2012.06.001. URL : http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X12000836 (visité le 29/08/2018).

[26] Andreas Festag. « Standards for vehicular communication—from IEEE 802.11p to 5G ». In : *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik* 132.7 (2015), p. 409–416. ISSN : 1613-7620. URL : https://doi.org/10.1007/s00502-015-0343-0.

[27] S. Floyd et V. Jacobson. « Random early detection gateways for congestion avoidance ». In : *IEEE/ACM Transactions on Networking* 1.4 (août 1993), p. 397–413. ISSN : 1063-6692. DOI : 10.1109/90.251892.

[28] Sally Floyd. « TCP and Explicit Congestion Notification ». In : *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.* 24.5 (oct. 1994), p. 8–23. ISSN : 0146-4833. DOI : 10.1145/205511.205512. URL : http://doi.acm.org/10.1145/205511.205512 (visité le 16/05/2019).

[29] Sally Floyd, Andrei Gurtov et Tom Henderson. *The NewReno Modification to TCP's Fast Recovery Algorithm*. URL : https://tools.ietf.org/html/rfc3782 (visité le 16/05/2019).

[30] Manuel Fogue et al. « A Realistic Simulation Framework for Vehicular Networks ». In : *Proceedings of the 5th International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques*. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics et Telecommunications Engineering), 2012, p. 37–46. ISBN : 978-1-4503-1510-4. URL : http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2263019.2263025 (visité le 29/09/2018).

[31] H. T. Friis. « A Note on a Simple Transmission Formula ». In : *Proceedings of the IRE* 34.5 (1946), p. 254–256. ISSN : 0096-8390. DOI : 10.1109/JRPROC.1946.234568.

[32] *Global Media Formats Report*. 2017. URL : https://www.encoding.com/files/2017-Global-Media-Formats-Report.pdf (visité le 30/09/2018).

[33] P. Gomes, C. Olaverri-Monreal et M. Ferreira. « Making Vehicles Transparent Through V2V Video Streaming ». In : *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 13.2 (juin 2012), p. 930–938. ISSN : 1524-9050. DOI : 10.1109/TITS.2012.2188289.

[34] V. K. Goyal. « Multiple description coding : compression meets the network ». In : *IEEE Signal Processing Magazine* 18.5 (sept. 2001), p. 74–93. URL : 10.1109/79.952806.

[35] S. Gräfling, P. Mähönen et J. Riihijärvi. « Performance evaluation of IEEE 1609 WAVE and IEEE 802.11p for vehicular communications ». In : *2010 Second International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*. 2010, p. 344–348. DOI : 10.1109/ICUFN.2010.5547184.

[36] Nishu Gupta, Arun Prakash et Rajeev Tripathi. « Medium Access Control Protocols for Safety Applications in Vehicular Ad-Hoc Network ». In : *Veh. Commun.* 2.4 (oct. 2015), p. 223–237. URL : 10.1016/j.vehcom.2015.10.001.

[37] Zeeshan Hameed Mir et Fethi filali. « LTE and IEEE 802.11p for vehicular networking : a performance evaluation ». In : *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* 2014.1 (mai 2014), p. 89. ISSN : 1687-1499. DOI : 10.1186/1687-1499-2014-89. URL : https://doi.org/10.1186/1687-1499-2014-89.

[38] C. Han et al. « Analytical Study of the IEEE 802.11p MAC Sublayer in Vehicular Networks ». In : *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 13.2 (juin 2012), p. 873–886. URL : 10.1109/TITS.2012.2183366.

[39] Mark Handley et al. *TCP Friendly Rate Control (TFRC) : Protocol Specification*. URL : https://tools.ietf.org/html/rfc5348 (visité le 16/05/2019).

[40] *HM Reference Software 16.16*. URL : https://hevc.hhi.fraunhofer.de/svn/svn_HEVCSoftware/tags/HM-16.16/.

[41] *International Telecommunication Union (ITU), ITU-T Rec. P.910 (04/2008) Subjective Video Quality Assessment Methods for Multimedia Applications, 2008.*

[42] V. Jacobson. « Congestion Avoidance and Control ». In : *Symposium Proceedings on Communications Architectures and Protocols*. SIGCOMM '88. event-place : Stanford, California, USA. New York, NY, USA : ACM, 1988, p. 314–329. ISBN : 978-0-89791-279-2. DOI : 10.1145/52324.52356. URL : http://doi.acm.org/10.1145/52324.52356 (visité le 16/05/2019).

[43] Boangoat Jarupan et Eylem Ekici. « A survey of cross-layer design for VANETs ». In : *Ad Hoc Networks* 9.5 (juil. 2011), p. 966–983. URL : 10.1016/j.adhoc.2010.11.007.

[44] D. Jiang et L. Delgrossi. « IEEE 802.11p : Towards an International Standard for Wireless Access in Vehicular Environments ». In : *VTC Spring 2008 - IEEE Vehicular Technology Conference*. Mai 2008, p. 2036–2040. DOI : 10.1109/VETECS.2008.458.

[45] *JM Reference Software 19*. URL : http://iphome.hhi.de/suehring/tml/.

[46] L. Jorguseski et al. « Radio resource allocation in third generation mobile communication systems ». In : *IEEE Communications Magazine* 39.2 (2001), p. 117–123. ISSN : 0163-6804. DOI : 10.1109/35.900640.

[47] Michel Kadoch. *Protocoles et réseaux locaux : 2e édition revue et augmentée*. Google-Books-ID : 530hB4BxwWQC. PUQ, 23 mar. 2012. 576 p. ISBN : 978-2-7605-3480-3.

[48] Mohammad Kazemi, Shervin Shirmohammadi et Khosrow Haj Sadeghi. « A review of multiple description coding techniques for error-resilient video delivery ». In : *Multimedia Systems* 20.3 (juin 2014), p. 283–309. ISSN : 1432-1882. DOI : 10.1007/s00530-013-0319-z. URL : https://doi.org/10.1007/s00530-013-0319-z.

[49] Chih-Heng Ke, Chong-Yi Yang et Jiann-Liang Chen. « A novel mapping mechanism for MPEG-4 video delivery over IEEE 802.11e networks ». In : *Multimedia Tools and Applications* 76.4 (fév. 2017), p. 5937–5949. URL : 10.1007/s11042-015-2791-2.

[50] Jirka Klaue, Berthold Rathke et Adam Wolisz. « EvalVid – A Framework for Video Transmission and Quality Evaluation ». In : *Computer Performance Evaluation. Modelling Techniques and Tools*. Springer, Berlin, Heidelberg, sept. 2003, p. 255–272. URL : 10.1007/978-3-540-45232-4_16.

[51] George Kokkonis et al. « Efficient algorithm for transferring a real-time HEVC stream with haptic data through the internet ». In : *Journal of Real-Time Image Processing* 12.2 (août 2016), p. 343–355. URL : 10.1007/s11554-015-0505-7.

[52] Daniel Krajzewicz et al. « Recent Development and Applications of SUMO – Simulation of Urban Mobility ». In : *International Journal on Advances in Systems and Measurements*. Déc. 2012, p. 128–138.

[53] A. Ksentini, M. Naimi et A. Gueroui. « Toward an improvement of H.264 video transmission over IEEE 802.11e through a cross-layer architecture ». In : *IEEE Communications Magazine* 44.1 (jan. 2006), p. 107–114. URL : 10.1109/MCOM.2006.1580940.

[54] M. A. Labiod et al. « Adaptive video streaming based on TFRC protocol in vehicular ad-hoc networks VANETs ». In : *2018 The 25th IEEE Symposium on Communications and Vehicular Technology (IEEE SCVT'18)*. 2018 The 25th IEEE Symposium on Communications and Vehicular Technology (IEEE SCVT'18). Oct. 2018. doi : 10.1109/SaCoNeT.2018.8585540.

[55] M. A. Labiod et al. « Cross-layer approach dedicated to HEVC low delay temporal prediction structure streaming over VANETs ». In : *2018 International Conference on Smart Communications in Network Technologies (SaCoNeT)*. 2018 International Conference on Smart Communications in Network Technologies (SaCoNeT). Oct. 2018, p. 120–125. doi : 10.1109/SaCoNeT.2018.8585540.

[56] Mohamed Aymen Labiod et al. « Cross-layer scheme for low latency multiple description video streaming over Vehicular Ad-hoc NETworks (VANETs) ». In : *AEU - International Journal of Electronics and Communications* 104 (1er mai 2019), p. 23–34. issn : 1434-8411. doi : 10.1016/j.aeue.2019.03.001. url : http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1434841118326827 (visité le 16/05/2019).

[57] Mohamed Aymen Labiod et al. « Enhanced adaptive cross-layer scheme for low latency HEVC streaming over Vehicular Ad-hoc Networks (VANETs) ». In : *Vehicular Communications* 15 (1er jan. 2019), p. 28–39. issn : 2214-2096. doi : 10.1016/j.vehcom.2018.11.004. url : http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214209618301864 (visité le 16/05/2019).

[58] Arne Lie et Jirka Klaue. « Evalvid-RA : trace driven simulation of rate adaptive MPEG-4 VBR video ». In : *Multimedia Systems* 14.1 (juin 2008), p. 33–50. issn : 1432-1882. doi : 10.1007/s00530-007-0110-0. url : https://doi.org/10.1007/s00530-007-0110-0.

[59] C.-H. Lin et al. « An adaptive cross-layer mapping algorithm for MPEG-4 video transmission over IEEE 802.11e WLAN ». In : *Telecommunication Systems* 42.3 (déc. 2009), p. 223. url : 10.1007/s11235-009-9182-9.

[60] N. Lu et al. « Connected Vehicles : Solutions and Challenges ». In : *IEEE Internet of Things Journal* 1.4 (2014), p. 289–299. issn : 2327-4662. doi : 10.1109/JIOT.2014.2327587.

[61] C. H. Mai, Y. C. Huang et H. Y. Wei. « Cross-Layer Adaptive H.264/AVC Streaming over IEEE 802.11e Experimental Testbed ». In : *2010 IEEE 71st Vehicular Technology Conference*. Mai 2010, p. 1–5. url : 10.1109/VETECS.2010.5493653.

[62] A. Mammeri, A. Boukerche et Z. Fang. « Video Streaming Over Vehicular Ad Hoc Networks Using Erasure Coding ». In : *IEEE Systems Journal* 10.2 (juin 2016), p. 785–796. url : 10.1109/JSYST.2015.2455813.

[63] S. Mangold et al. « Analysis of IEEE 802.11e for QoS support in wireless LANs ». In : *IEEE Wireless Communications* 10.6 (2003), p. 40–50. issn : 1536-1284. doi : 10.1109/MWC.2003.1265851.

[64] S. Milani et al. « A low-complexity packet classification algorithm for multiple description video streaming over IEEE802.11E networks ». In : *2008 15th IEEE International Conference on Image Processing*. Oct. 2008, p. 3072–3075. url : 10.1109/ICIP.2008.4712444.

[65] MINORU NAKAGAMI. « The m-Distribution—A General Formula of Intensity Distribution of Rapid Fading ». In : *Statistical Methods in Radio Wave Propagation*. Sous la dir. de W. C. HOFFMAN. Pergamon, 1960, p. 3 –36. isbn : 978-0-08-009306-2. doi : 10.1016/B978-0-08-009306-2.50005-4. url : http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080093062500054.

[66] A. T. Nasrabadi et al. « Investigating the PSNR calculation methods for video sequences with source and channel distortions ». In : *2014 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting*. Juin 2014, p. 1–4. doi : 10.1109/BMSB.2014.6873482.

[67] Michael Oche, Rafidah Md Noor et Johnson Ihyeh Aghinya. « Network centric QoS performance evaluation of IPTV transmission quality over VANETs ». In : *Computer Communications* 61 (mai 2015), p. 34–47. url : 10.1016/j.comcom.2014.12.001.

[68] *OpenStreetMap*. url : https://www.openstreetmap.org/.

[69] Cristhian Iza Paredes, Ahmad Mohamad Mezher et Mónica Aguilar Igartua. « Performance Comparison of H.265/HEVC, H.264/AVC and VP9 Encoders in Video Dissemination over VANETs ». In : *Smart Objects and Technologies for Social Good*. Springer, Cham, nov. 2016, p. 51–60. url : 10.1007/978-3-319-61949-1_6.

[70] I. Parvez et al. « A Survey on Low Latency Towards 5G : RAN, Core Network and Caching Solutions ». In : *IEEE Communications Surveys Tutorials* (2018), p. 1–1. doi : 10.1109/COMST.2018.2841349.

[71] D. Perdana et R. F. Sari. « Performance comparison of IEEE 1609.4/802.11p and 802.11e with EDCA implementation in MAC sublayer ». In : *2013 International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE)*. Oct. 2013, p. 285–290. url : 10.1109/ICITEED.2013.6676254.

[72] P. Piñol et al. « Evaluating HEVC video delivery in VANET scenarios ». In : *2013 IfiP Wireless Days (WD)*. Nov. 2013, p. 1–6. url : 10.1109/WD.2013.6686539.

[73] John Proakis et Salehi Masoud. *Digital Communications*. McGraw-Hill Education, 2017.

[74] Kostas E. Psannis. « HEVC in wireless environments ». In : *Journal of Real-Time Image Processing* 12.2 (août 2016), p. 509–516. url : 10.1007/s11554-015-0514-6.

[75] N. N. Qadri et al. « Multi-source video streaming in a wireless vehicular ad hoc network ». In : *IET Communications* 4.11 (juil. 2010), p. 1300–1311. issn : 1751-8628. doi : 10.1049/iet-com.2009.0458.

[76] Vijay T. Raisinghani et Sridhar Iyer. « Cross-layer design optimizations in wireless protocol stacks ». In : *Computer Communications* 27.8 (2004), p. 720 –724. issn : 0140-3664. doi : https://doi.org/10.1016/j.comcom.2003.10.011. url : http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140366403002913.

[77] Cristiano Rezende et al. « The selective use of redundancy for video streaming over Vehicular Ad Hoc Networks ». In : *Computer Networks* 81 (avr. 2015), p. 43–62. url : 10.1016/j.comnet.2014.12.010.

[78] Iain E. Richardson. *The H.264 Advanced Video Compression Standard*. 2nd. Wiley Publishing, 2010. isbn : 978-0-470-51692-8.

[79] C. Rosewarne et al. *High Efficiency Video Coding (HEVC) Test Model 16 (HM 16) Improved Encoder Description Update 9, Document : JCTVC-AB1002, Joint Collaborative Team on Video Coding (JCT-VC) of ITU-T SG16 WP3 and ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 28th Meeting : Torino, IT, July 2017, 15–21.*

[80] E. Setton et al. « Cross-layer design of ad hoc networks for real-time video streaming ». In : *IEEE Wireless Communications* 12.4 (2005), p. 59–65. issn : 1536-1284. doi : 10.1109/MWC.2005.1497859.

[81] S. Shakkottai, T. S. Rappaport et P. C. Karlsson. « Cross-layer design for wireless networks ». In : *IEEE Communications Magazine* 41.10 (2003), p. 74–80. issn : 0163-6804. doi : 10.1109/MCOM.2003.1235598.

[82] C. Sommer, S. Joerer et F. Dressler. « On the applicability of Two-Ray path loss models for vehicular network simulation ». In : *2012 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*. Nov. 2012, p. 64–69. doi : 10.1109/VNC.2012.6407446.

[83] V. Srivastava et M. Motani. « Cross-layer design : a survey and the road ahead ». In : *IEEE Communications Magazine* 43.12 (déc. 2005), p. 112–119. url : 10.1109/MCOM.2005.1561928.

[84] Thomas Stockhammer. « Dynamic Adaptive Streaming over HTTP – : Standards and Design Principles ». In : *Proceedings of the Second Annual ACM Conference on Multimedia Systems*. MMSys '11. event-place : San Jose, CA, USA. New York, NY, USA : ACM, 2011, p. 133–144. isbn : 978-1-4503-0518-1. doi : 10.1145/1943552.1943572. url : http://doi.acm.org/10.1145/1943552.1943572 (visité le 16/05/2019).

[85] G. J. Sullivan et al. « Overview of the High Efficiency Video Coding (HEVC) Standard ». In : *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology* 22.12 (déc. 2012), p. 1649–1668. url : 10.1109/TCSVT.2012.2221191.

[86] Vivienne Sze, Madhukar Budagavi et Gary J. Sullivan, éds. *High Efficiency Video Coding (HEVC) : Algorithms and Architectures*. Integrated Circuits and Systems. Springer International Publishing, 2014. isbn : 978-3-319-06894-7. url : //www.springer.com/us/book/9783319068947 (visité le 22/07/2018).

[87] « The Economic and Societal Impact of Motor Vehicle Crashes, 2010 (Revised)1 ». In : *Annals of Emergency Medicine* 66.2 (août 2015), p. 194–196. issn : 01960644. doi : 10.1016/j.annemergmed.2015.06.011. url : http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196064415005119 (visité le 09/08/2018).

[88] *The Network Simulator - ns-2, Isi.Edu.* url : http://www.isi.edu/nsnam/ns/.

[89] A. Torres et al. « Evaluating H.265 real-time video flooding quality in highway V2V environments ». In : *2014 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. 2014, p. 2716–2721. doi : 10.1109/WCNC.2014.6952858.

[90] Alvaro Torres et al. « Evaluation of flooding schemes for real-time video transmission in VANETs ». In : *Ad Hoc Networks*. Modeling and Performance Evaluation of Wireless Ad-Hoc Networks 24 (1er jan. 2015), p. 3–20. issn : 1570-8705. doi : 10.1016/j.adhoc.2014.07.030. url : http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1570870514001620.

[91] *UN System Task Team in September 2011*. url : http://www.un.org/millenniumgoals/pdf/Think%20Pieces/18_urbanization.pdf.

[92] A. Vinel. « 3GPP LTE Versus IEEE 802.11p/WAVE : Which Technology is Able to Support Cooperative Vehicular Safety Applications ? » In : *IEEE Wireless Communications Letters* 1.2 (avr. 2012), p. 125–128. issn : 2162-2337. doi : 10.1109/WCL.2012.022012.120073.

[93] A. Vinel et al. « An Overtaking Assistance System Based on Joint Beaconing and Real-Time Video Transmission ». In : *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 61.5 (juin 2012), p. 2319–2329. url : 10.1109/TVT.2012.2192301.

[94] Haohong Wang et al. *4G Wireless Video Communications*. Wiley Publishing, 2009. isbn : 978-0-470-77307-9.

[95] Yao Wang, A. R. Reibman et Shunan Lin. « Multiple Description Coding for Video Delivery ». In : *Proceedings of the IEEE* 93.1 (jan. 2005), p. 57–70. ISSN : 0018-9219. DOI : 10.1109/JPROC.2004.839618.

[96] Zhou Wang et al. « Image quality assessment : from error visibility to structural similarity ». In : *IEEE Transactions on Image Processing* 13.4 (avr. 2004), p. 600–612. ISSN : 1057-7149. DOI : 10.1109/TIP.2003.819861.

[97] *WHO | Road traffic deaths*. WHO. URL : http://www.who.int/gho/road_safety/mortality/en/ (visité le 09/08/2018).

[98] Mathias Wien. *High Efficiency Video Coding : Coding Tools and Specification*. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2015.

[99] H. Xie, A. Boukerche et A. A. F. Loureiro. « MERVS : A Novel Multichannel Error Recovery Video Streaming Protocol for Vehicle Ad Hoc Networks ». In : *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 65.2 (fév. 2016), p. 923–935. ISSN : 0018-9545. DOI : 10.1109/TVT.2015.2397862.

[100] Jianhua Ma Yan Zhang Laurence T. Yang. *Unlicensed Mobile Access Technology : Protocols, Architectures, Security, Standards and Applications*. Auerbach Publications, août 2008.

[101] S. Zaidi, S. Bitam et A. Mellouk. « Enhanced Adaptive Sub-Packet Forward Error Correction Mechanism for Video Streaming in VANET ». In : *2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. 2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Déc. 2016, p. 1–6. DOI : 10.1109/GLOCOM.2016.7841812.

[102] S. Zaidi, S. Bitam et A. Mellouk. « Enhanced user datagram protocol for video streaming in VANET ». In : *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. 2017, p. 1–6. DOI : 10.1109/ICC.2017.7997020.

[103] Sofiane Zaidi, Salim Bitam et Abdelhamid Mellouk. « Hybrid error recovery protocol for video streaming in vehicle ad hoc networks ». In : *Vehicular Communications* 12 (avr. 2018), p. 110–126. URL : 10.1016/j.vehcom.2018.01.002.

[104] Imane Zaimi et al. « An Evaluation of Routing Protocols for Vehicular Ad-Hoc Network Considering the Video Stream ». In : *Wireless Personal Communications* 98.1 (jan. 2018), p. 945–981. URL : 10.1007/s11277-017-4903-y.

Table des matières

Résumé **xiii**

Remerciements **xv**

Sommaire **xvii**

Liste des tableaux **xix**

Table des figures **xxi**

Introduction **1**

I Transmission vidéo dans les réseaux ad-hoc véhiculaire (VANET) 3

1 Contexte de l'étude **5**
1.1 Introduction 5
1.2 Contexte de l'étude 6
1.2.1 Développement des systèmes de transport intelligents 6
1.2.2 Applications et exigences du streaming vidéo dans les réseaux véhiculaires : 9
1.2.3 Normes de communication dans les systèmes de transport intelligents . . . 11
1.3 Codage et transmission de la vidéo numérique 14
1.3.1 Les dernières normes d'encodage vidéo 17
1.3.2 Vue d'ensemble du standard H.265/HEVC 17
1.4 Approche inter-couche 20
1.4.1 Définition de la conception de inter-couche (cross-layer) 21
1.4.2 Aperçu des propositions de conception à travers les couches 21
1.4.3 Conception multicouche pour la diffusion vidéo sans fil 24
1.4.4 Pourquoi la conception en inter-couche ? 24
1.5 Travaux connexes 24
1.6 Conclusion 25

2 Evaluation de la transmission vidéo dans les réseaux VANETs **27**
2.1 Introduction 27
2.2 Plateforme de simulation VANET 27
2.2.1 Environnement de simulation 27
2.2.2 Paramètres de simulation 29
2.2.3 Modélisation du canal véhiculaire 29

2.3 Critères d'évaluation 31
2.3.1 Séquence vidéo de référence 31
2.3.2 Métriques d'évaluation 32
2.4 Evaluation de la transmission vidéo dans les réseaux VANETs 34
2.4.1 Paramètres d'encodage vidéo 34
2.4.2 Caractéristiques intrinsèques des vidéos 37
2.5 Conclusion 39

II Amélioration de la transmission vidéo avec un système cross-layer basé sur la couche MAC 41

3 Solutions inter-couche pour le streaming à faible latence sur les réseaux VANET 43
3.1 Introduction 43
3.2 État de l'art 43
3.2.1 Gestion de la couche MAC du standard 802.11p 43
3.2.2 Vue d'ensemble des modes d'encodage H265 / HEVC 49
3.2.3 Travaux connexes 54
3.3 Solution 1 : Mécanisme inter-couches adaptatif pour la structure de prédiction temporelle à faible retard du HEVC 55
3.3.1 Algorithme d'acheminement adaptatif basé sur le type d'image 57
3.3.2 Analyse de l'efficacité de l'algorithme d'acheminement adaptatif dédié à la structure LD basé sur le type d'image proposé 59
3.4 Solution 2 : Schéma adaptatif inter-couches évolué pour la diffusion HEVC à faible latence 61
3.4.1 Algorithme d'acheminement inter-couches statique basé sur le codage HEVC hiérarchique 62
3.4.2 Algorithme d'acheminement inter-couches adaptative basé sur le codage HEVC hiérarchique 63
3.4.3 Scénarios adoptés pour l'analyse de la solution 64
3.4.4 Adaptation de la structure temporelle de l'encodage low delay du HEVC . 65
3.4.5 Analyse de l'efficacité de l'algorithme d'acheminement adaptatif amélioré basé sur l'encodage hiérarchique du HEVC 65
3.4.6 Estimation du délai bout en bout pour les différentes structures d'encodage 71
3.5 Conclusion 72

4 Solution inter-couche pour le streaming à faible latence basée sur un encodage à descriptions multiples 73
4.1 Introduction 73
4.2 État de l'art 74
4.2.1 Codage à descriptions multiples 74
4.2.2 Travaux connexes 75
4.3 Solution 3 : Schéma inter-couche adaptatif pour la diffusion vidéo en continu encodée à faible latence en descriptions multiples 76
4.3.1 Description du système proposé 76
4.3.2 Algorithme d'acheminement statique 77
4.3.3 Algorithme d'acheminement adaptatif 77
4.3.4 Analyse de l'efficacité de l'algorithme d'acheminement adaptatif basé sur un encodage à description multiple 78

4.4 Conclusion 82

III Amélioration de la transmission vidéo avec un système cross-layer basé sur la couche transport 83

5 Amélioration de la transmission vidéo avec un système cross-layer basé sur la couche transport 85
5.1 Introduction 85
5.2 État de l'art 85
5.2.1 Algorithme du protocole TCP 86
5.2.2 Les Variantes du protocole TCP 87
5.3 Comparaison entre les différents protocoles de transports pour une transmission vidéo 89
5.4 Mécanisme d'adaptation vidéo dans les VANETs 90
5.5 Conclusion 92

Conclusion et perspectives 93

Production scientifique 97
Articles de revues internationales : 97
Communications internationales avec actes : 97
Communications sans actes : 97

Bibliographie 99

Table des matières 107

Contribution à l'amélioration des transmissions vidéo dans les réseaux ad-hoc véhiculaires (VANET)

Résumé

Actuellement les communications véhiculaires sont devenues une réalité guidée par diverses applications. Notamment, la diffusion de vidéo de qualité élevée avec des contraintes de faible latence requises par les applications temps réel. Grâce au niveau de compression jamais atteint auparavant, l'encodeur H.265/HEVC est très prometteur pour la diffusion de vidéos en temps réel dans les réseaux ad hoc véhiculaire (VANET). Néanmoins, la qualité de la vidéo reçue est pénalisée par les mauvaises caractéristiques du canal de transmission (disponibilité, non stationnarité, rapport signal à bruit, etc.). Afin d'améliorer et d'assurer une qualité vidéo optimale à la réception nous proposons dans ce travail une optimisation conjointe source-canal-protocole de la transmission en tenant compte à la fois des paramètres de transmission et d'encodage vidéo.
Dans un premier temps, nous montrons l'intérêt et le gain apporté par les solutions dites inter-couches « cross-layer ». Par la suite, nous développons deux approches l'une exploitant un « cross-layer » entre la couche application et la couche MAC et une seconde exploitant les protocoles de transports dans l'adaptation du flux vidéo. En ce qui concerne la première approche nous proposons une solution utilisant une gestion hiérarchique des trames au niveau des files d'attentes de la couche MAC, basée sur l'importance des images du flux vidéo. Dans une seconde solution, nous retenons le codage par descriptions multiples comme solution de protection à la source. Les résultats de simulations obtenus pour plusieurs types de scénarios véhiculaires réalistes montrent que les différents schémas de transmission véhiculaire proposés offrent des améliorations significatives en termes de qualité vidéo à la réception et de retard de bout en bout par rapport aux schémas classiques.

Mots clés : HEVC, inter-couche, faible délai, VANET, IEEE 802.11p, MAC, MDC.

Abstract

At present, vehicular communications have become a reality guided by various applications. In particular, high-quality video delivery with low latency constraints is required for real-time applications. The new state-of-the-art high-effciency video coding (HEVC) standard is very promising for real-time video streaming in vehicular ad hoc networks (VANET). Nevertheless, these networks have variable channel quality and a limited bandwidth that penalizes the overall performances of end-to-end video transmission. In order to meet these constraints, we proposed in this work to consider both transmission and video encoding parameters through a joint source-channel-protocol coding approach to provide an improvement in video transmission.
First, we have shown the interest and the gain brought by the "cross-layer" solutions. Then, we developed two approaches. The first one exploits a "crosslayer" solution between the application layer and the Medium Access Control (MAC) layer while the second exploits the transport layer protocols in the adaptation of the video stream. Regarding the first approach, we have proposed solutions to allocate the frames to the most appropriate Access Category (AC) queue on the MAC layer based on the image importance in the video stream. In another solution, we chose multiple descriptions source coding as an error resilient solution. Thus, the simluation results obtained for different realistic vehicular scenarios demonstrate that the proposed transmission schemes offer significant video quality improvements and end-to-end delay reduction compared to conventional transmission schemes.

Keywords: HEVC, cross-layer, low delay, VANET, IEEE 802.11p, MAC, MDC.

Institut d'Electronique, de Micro-Electronique et de Nanotechnologie (IEMN/DOAE) – et Laboratoire d'Automatique et Signaux d'Annaba (LASA)

– – – – –