

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITÉ ABDERRAHMANE MIRA DE BÉJAÏA  
FACULTÉ DES SCIENCES EXACTES  
DÉPARTEMENT DE RECHERCHE OPÉRATIONNELLE



## *Mémoire de Master*

En Recherche Opérationnelle

Spécialité : Fiabilité et Évaluation des Performances des Réseaux

*Thème :*

---

Modélisation Analytique et Évaluation des Performances du IEEE 802.11e-EDCA dans un Environnement Radio

---

Réalisé par :

M<sup>r</sup> Nassim SAHKI

Devant le juré composé de :

Président	M <sup>elle</sup> Amal	TIAB	Doctorante	Université de Béjaïa
Rapporteurs	M <sup>me</sup> Louiza	BOUALLOUCHE	MCA	Université de Béjaïa
	M <sup>r</sup> Mohand	YAZID	MAB	Université de Béjaïa
Examineurs	M <sup>me</sup> Samira	OUYAHIA	MAA	Université de Béjaïa
	M <sup>me</sup> Souad	LAHLAH	Doctorante	Université de Béjaïa

Promotion 2012/2013.

## Résumé

---

*La modélisation analytique et l'analyse des performances de la norme IEEE 802.11e a été le sujet de recherche de plusieurs articles publiés dans la littérature. En particulier, le troisième paramètre de différenciation de service "TXOPlimit", a été prouvé efficace pour augmenter le débit des flux Audio/Vidéo du réseau IEEE 802.11e-EDCA. Cependant, ces études ont été effectuées en considérant un canal de transmission idéal. Dans notre travail, nous avons pour objectif de proposer une extension des modèles mathématiques existants de la norme IEEE 802.11e, en vue de prendre en compte, en plus du paramètre TXOPlimit, les conditions réelles de propagation des ondes radio, et aussi du mécanisme de fragmentation de paquets de données. Nos résultats analytiques montrent pour la première fois que, le TXOPlimit qui est conçu originellement pour augmenter le débit, n'a aucun effet dans un canal perturbé. Nous avons aussi montré que l'application du mécanisme de fragmentation permet aux stations virtuelles Audio/Vidéo d'augmenter leurs débit effectifs, en exploitant au maximum possible les périodes CFBs qui leurs ont été attribuées.*

---

**Mots clés** : IEEE 802.11e-EDCA, TXOPlimit, Fragmentation, Environnement radio, Chaînes de Markov, Modélisation et analyse

---

## Abstract

---

*Analytical modeling and performance analysis of the IEEE 802.11e-EDCA network has been the subject of several papers published in the literature. Particularly, the TXOPlimit which is the third parameter of service differentiation, has been proved efficient to increase the throughput of Voice/Vedio streaming in an IEEE 802.11e-EDCA network. However, these studies have been done under the assumption of ideal channel. In this work, we aim to propose an extension of the existing IEEE 802.11e-EDCA mathematical models, in order to take into account the TXOPlimit in real conditions of radio waves propagation, and the packet fragmentation mechanism. The obtained analytical results, show for the first time in the literature that, the TXOPlimit is not useful in a noisy channel. We have also showed that, the packet fragmentation mechanism allows to increase the throughput of access categories (Voice/Vedio).*

---

**Key words** : IEEE 802.11e-EDCA, TXOPlimit, Fragmentation, Noisy channel, Markov Chains, Modeling and analysis

# Remerciement

*En premier lieu, je remercie le bon Dieu de nous avoir donné la force et le courage pour la réalisation de ce travail.*

*J'aimerais adresser mes vifs remerciements à Madame L. BOUALLOUCHE pour tout ce qu'elle fait pour le bien du département, soit à titre humanitaire ou scientifique. Je tiens à exprimer ma sincère gratitude pour son encadrement et la confiance qu'elle a mis sur nos mains.*

*Mes grands remerciements à Monsieur M. YAZID pour m'avoir soutenu durant ce travail. Je souhaite lui transmettre l'expression de ma reconnaissance et mon plus profond Respect.*

*Je remercie tout particulièrement les membres de jury, qui ont accepté de juger ce travail. Melle. TIAB en tant que présidente, Mme. OUYAHIA et Mme. LAHLAH en tant qu'examinatrices.*

*★ À l'hommage de mes grands parents ★*

# Table des matières

<b>Table des matières</b>	<b>i</b>
<b>Table des figures</b>	<b>v</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>vi</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>1 Standard IEEE 802.11 et Qualité de Service</b>	<b>4</b>
1.1 Introduction . . . . .	4
1.2 Présentation du Standard IEEE 802.11 . . . . .	5
1.3 Architecture des réseaux IEEE 802.11 . . . . .	7
1.3.1 Réseau en infrastructure . . . . .	7
1.3.2 Réseau en Ad-hoc . . . . .	8
1.4 La couche physique (PHY) . . . . .	8
1.5 La couche Medium Access Control (MAC) . . . . .	9
1.5.1 Distributed Coordination Function (DCF) . . . . .	10
1.5.2 Point Coordination Function (PCF) . . . . .	13
1.5.3 Fragmentation et Réassemblage . . . . .	13
1.6 Qualité de Service dans IEEE 802.11 . . . . .	14
1.6.1 Enhanced Distributed Channel Access (EDCA) . . . . .	15
1.6.2 Hybrid coordination function Controlled Channel Access (HCCA) . . . . .	18
1.6.3 Autres paramètres de QoS définis par l'amendement 802.11e . . . . .	19
1.7 Conclusion . . . . .	20

<b>2</b>	<b>Synthèse sur les travaux existants, motivations et problématique</b>	<b>21</b>
2.1	Introduction . . . . .	21
2.2	Modèles analytiques existants . . . . .	22
2.2.1	Modèle de G.Bianchi et son évolution . . . . .	22
2.2.2	Modèles analytiques pour EDCA . . . . .	22
2.3	Problématiques et caractéristiques des liens radios . . . . .	24
2.3.1	Opération Half-Duplex . . . . .	24
2.3.2	Phénomènes de variation du canal sans fil . . . . .	24
2.3.3	Rafales d’erreurs dans le canal . . . . .	26
2.4	Etude critique sur l’existant et motivations . . . . .	27
2.5	Proposition . . . . .	28
2.6	Conclusion . . . . .	29
<b>3</b>	<b>Modélisation analytique du protocole d’accès IEEE 802.11e-EDCA</b>	<b>30</b>
3.1	Introduction . . . . .	30
3.2	Description générale du modèle . . . . .	31
3.2.1	Hypothèses du modèle . . . . .	31
3.2.2	Métriques de performance . . . . .	31
3.2.3	Paramètres du modèle . . . . .	32
3.2.4	Probabilités du modèle . . . . .	33
3.3	Description détaillée du modèle analytique EDCA . . . . .	33
3.3.1	Proposition d’une chaîne de Markov pour 802.11e-EDCA . . . . .	33
3.3.2	Calcul du débit de saturation . . . . .	38
3.4	Conclusion . . . . .	42
<b>4</b>	<b>Analyse des performances du IEEE 802.11e-EDCA</b>	<b>43</b>
4.1	Introduction . . . . .	43
4.2	Procédé d’analyse et paramètres utilisés . . . . .	44
4.2.1	Méthode d’analyse et logiciels utilisés : . . . . .	44
4.2.2	Valeurs des paramètres utilisés : . . . . .	44
4.2.3	Principaux cas à analyser . . . . .	45

4.2.4	Etat du canal et variation du taux d'erreur . . . . .	45
4.3	Analyse des résultats analytiques . . . . .	46
4.3.1	Analyse de la dégradation des performances EDCA-sans CFB . . . . .	46
4.3.2	Analyse de l'impact du mode CFB (TXOPlimit) : . . . . .	49
4.3.3	Analyse du mécanisme de fragmentation (PFM) . . . . .	51
4.4	Conclusion . . . . .	52

**Conclusion générale** **54**

**Bibliographie** **56**

# Table des figures

1.1	La famille IEEE 802. . . . .	5
1.2	Les principaux standards 802.11. . . . .	6
1.3	Le mode de fonctionnement du 802.11 . . . . .	7
1.4	Extended Service Set (ESS) . . . . .	8
1.5	Le format générique d'une trame MAC 802.11 . . . . .	11
1.6	Le mécanisme d'accès DCF (sans RTS/CTS) . . . . .	11
1.7	Le mécanisme d'accès RTS/CTS . . . . .	12
1.8	Le mécanisme d'interrogation utilisé dans PCF . . . . .	13
1.9	Le mécanisme de fragmentation des paquets . . . . .	14
1.10	L'architecture de la sous-couche MAC de 802.11e . . . . .	15
1.11	Le mécanisme d'accès EDCA . . . . .	16
1.12	Un burst de paquet contrôlé par TXOPlimit . . . . .	17
1.13	Virtuel Backoff des 4 classes de trafic . . . . .	18
1.14	Les périodes CAP/CFP/CP du HCCA . . . . .	19
2.1	Multipath . . . . .	25
3.1	Chaîne de Markov modélisant les états de Backoff et les états de transmission d'une catégorie d'accès h donnée . . . . .	34
4.1	Débits atteignables en fonction du nombre de stations (sans CFB) . . . . .	46
4.2	Débits atteignables en fonction du taux d'erreur par bit (sans CFB) . . . . .	47
4.3	Débits atteignables en fonction de la taille du paquet (sans CFB) . . . . .	48
4.4	Débits atteignables en fonction du nombre de stations (avec CFB) . . . . .	49

4.5	Débits atteignables en fonction du nombre de stations (avec CFB) . . . . .	50
4.6	Débits atteignables en fonction du nombre de stations (CFB et PFM) . . . . .	52



# Liste des tableaux

1.1	Relation entre les priorités et les catégories d'accès dans EDCA . . . . .	16
1.2	Les paramètres de différenciation par défaut d'EDCA . . . . .	18
3.1	Paramètres du modèle . . . . .	33
4.1	Paramètres de la couche PHY HR-DSSS et de la couche MAC . . . . .	44
4.2	Paramètres de différenciation par défaut d'EDCA . . . . .	45
4.3	Variation de la valeur $P_e$ en fonction du BER et P . . . . .	46

# Introduction générale

Les réseaux locaux sans fil (Wireless LANs) ayant connu une évolution importante ces dernières années, sont en passe de devenir l'une des principales solutions de connexion pour de nombreux organismes. Jusqu'à présent, les WLANs ont essentiellement été implémentés dans les usines, entrepôts et magasins de détail. La croissance attendue touchera les activités de santé, les institutions éducatives et les bureaux des grandes entreprises, les salles de conférences, les zones publiques et les agences locales. Les services autour des techniques de contrôle d'accès au canal sans fil se développent rapidement [38]. Ainsi, une forte pression est mise sur les équipementiers et les fournisseurs d'accès afin de garantir des niveaux de qualité de services se rapprochant voire équivalents à ceux assurés par les réseaux filaires.

L'organisme Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) a ratifié la spécification 802.11 [01], norme régissant les réseaux locaux sans fil, en 1997. Le standard IEEE 802.11 s'est rapidement imposé et est considéré comme la version Ethernet des WLANs. Cependant, le débit très faible limite les perspectives de développement de l'industrie du WLAN. Conscient de la nécessité d'augmenter ce débit, l'IEEE a homologué la spécification 802.11g et actuellement la 802.11n [08], qui entérinent des transmissions de 54 et 100 Mega bits par seconde, respectivement.

Etant donné cette augmentation de capacité des réseaux 802.11, de plus en plus d'opérateurs de réseaux ont comme perspective de proposer des services temps réel (tel que la Voix sur IP, les jeux en réseau, la vidéo à la demande, la visioconférence, etc.) pour ce type de réseau. Ces services définissent un ensemble de contraintes connues sous le terme de Qualité de Service (QoS). Dans le domaine des réseaux et télécommunications, ce terme désigne tout mécanisme permettant d'adapter le comportement du réseau aux besoins des applications. Cette notion englobe les mécanismes permettant d'allouer une proportion des ressources du réseau à un flux de données, de lui garantir, par exemple, un délai borné, un taux de perte limité.

En 1999, le standard 802.11 a défini la méthode d'accès distribuée DCF (Distributed Coordination Function) [07]. Cette dernière a été conçue pour le support unique des applications de transfert de données et du web, et il n'a pas été prévu initialement que le standard DCF puisse

être utilisé par les applications exigeantes en termes de QoS comme la voix et la vidéo. Dès lors, 802.11 DCF a été incapable d'assurer la performance demandée par ce type d'applications. La présence de cette limitation accompagnée du besoin croissant du multimédia a poussé les activités de recherche à investiguer et proposer différentes solutions possibles capables d'améliorer la performance des WLANs. Parmi ces différentes solutions, une solution basée sur la différenciation de service a été retenue par l'IEEE 802.11 qui a fondé un groupe de travail qui a abouti en 2005 à la standardisation d'un amendement de QoS appelée 802.11e [02]. Dans cet amendement, DCF a été remplacée par EDCA (Enhanced Distributed Channel Access) qui supporte quatre catégories d'accès (AC), chacune possède ses propres paramètres d'accès : Arbitration Inter Frame Spacing (AIFS), Contention Window (CW) et Transmission Opportunity Limit (TXOPlimit). La priorité de chaque catégorie d'accès est définie par les valeurs des ces paramètres qui ne sont pas fixes comme dans DCF mais ajustables selon les besoins.

IEEE 802.11e-EDCA a réussi à améliorer la performance du 802.11. La différenciation de service qui y est introduite a abouti à de bons comportements du protocole avec les applications ayant des contraintes de QoS. Cependant, lorsque le réseau est saturé, aucune garantie de QoS ne peut être assurée par EDCA. Plusieurs études d'évaluation d'EDCA ont démontré cette limitation, et plusieurs propositions d'amélioration ont essayé de résoudre ce problème. La problématique commune provient du fait que la majorité de ces études ont utilisé le modèle de Bianchi [28], un modèle analytique proposé pour DCF qui suppose que le canal de transmission est parfait. Or cette hypothèse n'est pas valable dans un réseau sans fil, car l'environnement radio affecte beaucoup la qualité du signal transmis. En outre, pour l'adapter au mécanisme EDCA, ils l'ont simplement modifié pour la prise en considération de la différenciation de service. Malheureusement, plusieurs caractéristiques de la nouvelle procédure EDCA ont été ignorées comme le TXOPlimit.

Dans ce projet de Master, nous nous intéressons à l'évaluation de performances du mécanisme d'accès IEEE 802.11e-EDCA, fonctionnant dans un environnement radio. Pour ce faire, nous proposons une modélisation analytique à l'aide d'une chaîne de Markov, qui prend en considération tout les paramètres de différenciation EDCA et qui met en évidence l'état du canal de transmission imparfait, en introduisant le taux d'erreur par paquet. Ceux-ci, permettent de refléter plus fidèlement le fonctionnement réel du protocole et de prédire des résultats plus réalistes. Par la suite, nous analysons l'impact du paramètre TXOPlimit pour augmenter les performances du réseau. Par ailleurs, nous proposons d'appliquer le mécanisme de fragmentation dans le but d'analyser le niveau d'amélioration qu'il procure pour réduire l'influence des paramètres du taux de perte (taux d'erreur par bit, taille du paquet) sur les performances du réseau IEEE 802.11e-EDCA.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres, dans le premier chapitre, nous présenterons le standard IEEE 802.11 et ses mécanismes d'accès, nous discuterons en suite leurs limitations,

qui sont à la base de l'apparition du mécanisme EDCA à l'avènement de l'ammendement 802.11e. Dans le deuxième chapitre, nous dresserons une synthèse sur les travaux d'évaluation des performances du protocole IEEE 802.11e-EDCA, nous détaillerons la problématique de la transmission sans fil et nous définirons nos objectifs et contributions. Le troisième chapitre, sera consacré à la proposition d'un modèle analytique global pour le mécanisme d'accès EDCA du standard IEEE 802.11e, capable d'estimer les métriques de performance dans les conditions de saturation. Dans le dernier chapitre, nous mettrons l'accent sur l'analyse des performances du protocole 802.11e-EDCA, où nous présenterons nos résultats analytiques.

# 1

## Standard IEEE 802.11 et Qualité de Service

### 1.1 Introduction

La mobilité des utilisateurs et leurs besoins d'accès itinérant aux réseaux informatiques rendent les réseaux filaire obsolètes. De plus, le besoin accru d'accéder à différents types d'applications via le support radio pousse la recherche vers de nouvelles solutions de plus en plus adaptées à cet environnement. Ainsi, on note ces dernières années des avancées rapides dans la standardisation de nombreuses technologies sans fils allant des réseaux personnels à faible couverture jusqu'aux réseaux à couverture mondiale.

Dans notre étude, nous nous intéressons au standard 802.11, nommé également WiFi (Wireless Fidelity). Les réseaux locaux sans fil (Wireless Local Area Network ou WLAN) du standard 802.11 ont reçu ces dernières années un grand succès grâce à leur simplicité, rapidité et faible coût de déploiement [07]. Dès lors, ils constituent une alternative sérieuse aux réseaux locaux filaires. On commence d'ailleurs à les trouver partout : dans les aéroports, les hôtels, les bureaux et ainsi que dans les environnements domestiques.

Ces réseaux ont été initialement conçus pour les applications de transfert de données et de

la navigation Web. Aujourd’hui, avec l’avènement de la VoIP et de la vidéo sur les réseaux IP, l’extension du potentiel de ce type de réseau pour le support des applications multimédia devient une réalité. Pour répondre à ce besoin, on assiste depuis une dizaine d’années à une augmentation constante des performances de ces réseaux aussi bien au niveau physique qu’au niveau liaison de données [07]. Au niveau physique, de nouvelles propositions, appelées amendements [02], apparaissent régulièrement visant à augmenter la bande passante des réseaux 802.11 par l’introduction de nouvelles techniques de modulation du signal sur les bandes de fréquences dédiées aux WLANs. Au niveau liaison de données, on s’intéresse à l’utilisation de cette bande passante avec priorité d’accès. Ainsi, au niveau du contrôle d’accès au canal, on trouve le fameux standard 802.11e qui s’intéresse à introduire de la QoS (Quality of Service) dans la norme 802.11 [01].

Dans ce chapitre, nous mettons l’accent sur quelques éléments essentiels caractérisant le standard IEEE 802.11. Puis nous nous concentrons sur la couche liaison de données et les mécanismes de contrôle d’accès au canal, dans la section 1.4. Nous discuterons ensuite les limitations de ces mécanismes d’accès pour l’acheminement des applications multimédia et l’apparition du 802.11e, dans la section 1.5.

## 1.2 Présentation du Standard IEEE 802.11

Le 802.11 est issu de la famille 802, qui est une série de spécifications d’un contrôle d’accès au médium et de plusieurs couches physiques pour la connectivité sans fil de stations fixes ou mobiles dans une ”zone locale”. La Figure 1.1 montre la relation entre les différents composants de la famille 802 et leurs emplacements dans le modèle OSI [01].

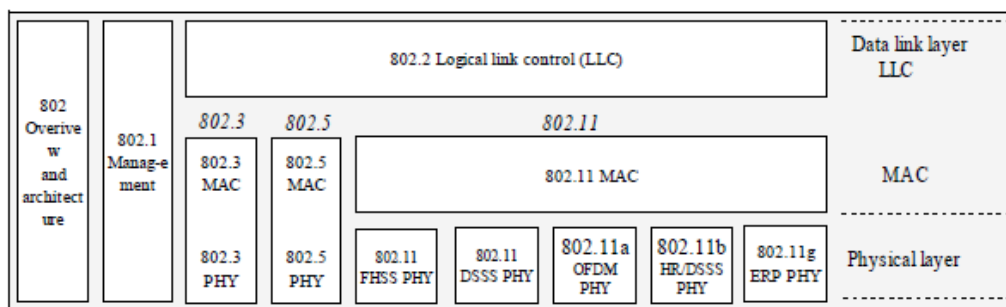


FIGURE 1.1 – La famille IEEE 802.

Comme les spécifications 802, le standard IEEE 802.11 couvre les deux couches inférieures du modèle OSI : la couche MAC (Medium Access Control) et la couche physique (PHY). La couche MAC définit un ensemble de règles permettant d’accéder au médium et d’envoyer des

données, les détails de la réception et de la transmission sont traités au niveau de la couche physique.

Le premier standard IEEE 802.11 dédié aux réseaux locaux sans fil (WLANs) a été proposé en 1990, la version finale de ce standard a vu le jour en 1997 [01]. Les débits théoriques étaient de 1 à 2 Mbits/s. Ensuite, de nombreuses améliorations ont été apportées au standard par rapport à sa version d'origine. Ces améliorations sont en constante évolution et de nouvelles couches physiques ont vu le jour sous les appellations IEEE 802.11 b/a/g/n résumées comme suit :

Standard IEEE	Notes
802.11a	La norme 802.11a (baptisé WiFi 5) permet d'obtenir un haut débit (54 Mbps théoriques, 30 Mbps réels). La norme 802.11a spécifie 8 canaux radio dans la bande de fréquence de 5 GHz.
802.11b	La norme 802.11b est la norme la plus répandue actuellement. Elle propose un débit théorique de 11 Mbps (6 Mbps réels) avec une portée pouvant aller jusqu'à 300 mètres dans un environnement dégagé. La plage de fréquence utilisée est la bande des 2.4 GHz.
802.11e	La norme 802.11e vise à donner des possibilités en matière de qualité de service au niveau MAC. Ainsi cette norme a pour but de définir les besoins des différents paquets en terme de bande passante et de délai de transmission de telle manière à permettre notamment une meilleure transmission de la voix et de la vidéo.
802.11g	La norme 802.11g offre un haut débit (54 Mbps théoriques, 30 Mbps réels) sur la bande de fréquence des 2.4 GHz. La norme 802.11g a une comptabilité ascendante avec la norme 802.11b, ce qui signifie que les matériels conformes à la norme 802.11 g peuvent fonctionner en 802.11b.
802.11i	La norme 802.11i a pour but d'améliorer la sécurité des transmissions (gestion et distribution des clés, chiffrement et authentification). Cette norme s'appuie sur l'Advanced Encryption Standard (AES) et propose un chiffrement des communications pour les transmissions utilisant les technologies 802.11a, 802.11b et 802.11g.
TG <sub>n</sub> (le future 802.11n)	Ce groupe a été fondé dans le but de créer un standard haut débit. Le débit visé tourne autour de 100 Mbps.
TG <sub>p</sub> (le future 802.11p)	Ce groupe vise à adopter 802.11 pour l'utilisation dans les voitures.
TG <sub>s</sub> (le future 802.11s)	Améliore 802.11 pour une utilisation dans les réseaux Mesh.

FIGURE 1.2 – Les principaux standards 802.11.

## 1.3 Architecture des réseaux IEEE 802.11

Le standard définit une BSS (Basic Service Set) comme étant le bloc constituant d'un réseau local 802.11. Une BSS est typiquement composée d'un point d'accès (AP, Access Point) et d'une ou plusieurs stations (STAs). Une IBSS (Independent Basic Service Set) est un bloc constituant d'un réseau ad hoc, il est donc constitué d'au moins deux stations sans infrastructure fixe.

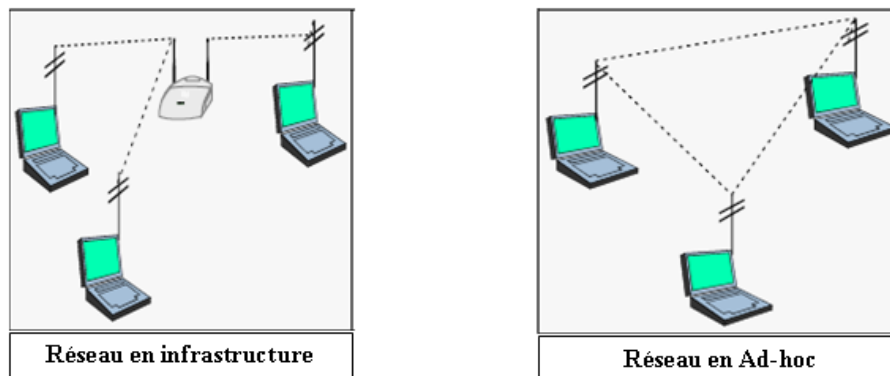


FIGURE 1.3 – Le mode de fonctionnement du 802.11

### 1.3.1 Réseau en infrastructure

La Figure 1.4 représente un réseau 802.11 organisé en infrastructure où la présence d'un point d'accès est obligatoire. Toutes les communications dans une cellule (BSS) couverte par un AP passe par ce dernier. Si une station A transmet des données vers la station B, les paquets suivent deux étapes : de la station A vers l'AP ; du AP vers la station B. Généralement, c'est aux stations sans fil d'initialiser l'association, par la suite c'est l'AP qui décide d'accepter ou de refuser la demande d'association. Une station sans fil ne peut s'associer qu'avec un seul point d'accès à la fois.

Par ailleurs, il est possible de relier plusieurs points d'accès entre eux (ou plus exactement plusieurs BSS) par une liaison appelée système de distribution ou Distribution System (DS). L'ensemble constitue un service étendu ou Extended Service Set (ESS), voir la Figure 1.4. Le DS peut être aussi bien un réseau filaire, qu'un câble entre deux points d'accès ou bien même un réseau sans fil.



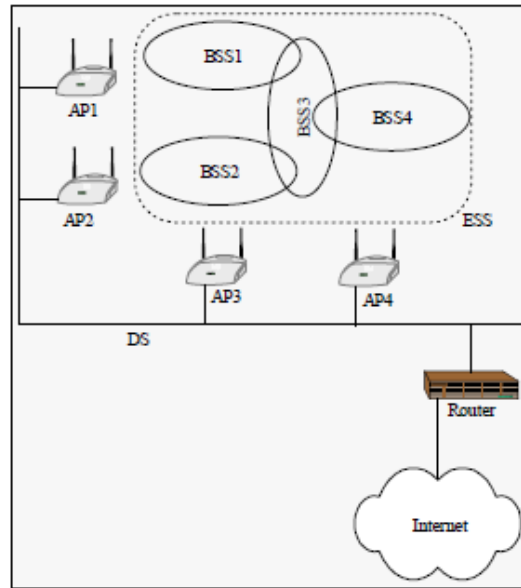


FIGURE 1.4 – Extended Service Set (ESS)

### 1.3.2 Réseau en Ad-hoc

Dans un réseau en mode ad-hoc, les stations forment un indépendant BSS (IBSS). Un réseau en mode IBSS permet aux stations de communiquer sans l'aide d'une quelconque infrastructure. Chaque station peut établir une communication avec n'importe quelle autre station dans l'IBSS, sans être obligée de passer par un point d'accès.

## 1.4 La couche physique (PHY)

Initialement, la version originale du standard 802.11 a défini trois couches physiques (FHSS, DSSS, IR), auxquelles 802.11a a ajouté OFDM, 802.11b a ajouté HR/DSSS et plus récemment MIMO par 802.11n :

**FHSS (Frequency-Hopping Spread Spectrum) :** La FHSS [03] désigne une technique d'étalement de spectre fondée sur le saut de fréquence, dans laquelle la bande ISM (Industrial Scientific Medical) de 2.4 GHz est divisée en 79 canaux ayant chacun 1 MHz de largeur. Pour l'envoi des données, l'émetteur et le récepteur s'accordent sur un ordre de séquences de sauts précis effectué sur les 79 sous-canaux. Selon un ordre préétabli, ces sauts ont lieu toutes les 300ms. Celui-ci est établi de manière optimale de façon à minimiser les probabilités de collision entre plusieurs transmissions simultanées. Ce mode permet un débit physique de 1 Mbit/s (si la modulation utilisée est une 2GFSK) ou 2 Mbit/s (si la modulation utilisée est une 4GFSK).

**DSSS (Direct-Sequence Spread Spectrum)** : Par analogie à la FHSS, la technique d'étalement du spectre DSSS divise la bande ISM en sous-bandes. Cependant, la division se fait en 14 canaux de 22 MHz chacun. Ainsi, le spectre détermine une fréquence centrale dans chaque canal espacée de 5 MHz par rapport à ses voisines. Puisque la transmission ne se fait que via un seul canal, la technique DSSS [06] est par conséquent plus sensible aux interférences que la FHSS qui s'étale sur toute la largeur de la bande ISM. Ce mode permet un débit physique de 1 Mbit/s (si le déplacement de phase est binaire DBPSK) ou 2 Mbit/s (si le déplacement de phase est quadratique DQPSK).

**OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing)** : Cette technique fait appel au multiplexage par la répartition des fréquences sur des porteuses orthogonales [05] dans la bande de 5 GHz. Cette orthogonalité permet de séparer les canaux afin d'éviter les interférences du canal. Un des points forts de l'OFDM est sa robustesse face à l'évanouissement par multi-trajet et son débit binaire pouvant atteindre 54 Mbit/s.

Nous pouvons dire pour résumer cette méthode qu'en présence de chemin multiple, à débit total équivalent, l'agrégation d'un certain nombre de canaux lents donne de meilleurs résultats qu'un seul canal très rapide.

**HR/DSSS (High Rate DSSS)** : ce mode se propose d'étendre le mode DSSS afin d'offrir des débits physiques plus importants. Une modulation code complémentaire (CCK Complementary Code Keying) sera utilisée permettant d'obtenir des débits de 5.5 Mbit/s et de 11 Mbit/s [08].

**ERP (Extended Rate Physical Layer)** : combine un ensemble de mécanismes introduits par les spécifications précédentes (notamment l'introduction de l'OFDM) pour améliorer les débits physiques (allant de 5.5 Mbit/s à 54 Mbit/s) dans la bande de fréquence 2.4 GHz.

**MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)** : permet d'augmenter le débit sur un seul canal en créant davantage de trajets hertziens pour la transmission des données. Grâce à des antennes d'émission et de réception multiples, chaque trajet peut véhiculer un ensemble différent de données sur la même fréquence. MIMO améliore la capacité du réseau en accélérant la transmission des données. Les propositions actuelles (par le groupe 802.11n)[01] prévoient des largeurs de canaux de 20 et 40 MHz afin d'autoriser une exploitation dans le monde entier et d'accroître la capacité de transmission de données.

## 1.5 La couche Medium Access Control (MAC)

L'objectif principal de la couche MAC consiste à fournir des services de données fiables pour les protocoles des couches supérieures. Cependant, celle du IEEE 802.11 reste particulière et

spécifique car elle offre davantage de fonctions par rapport à une couche MAC classique (allocation du support, adressage, formatage des trames). Ces fonctions supplémentaires offertes comme, les sommes de contrôle Cyclic Redundancy Check (CRC), la fragmentation et le réassemblage (très utile car le support radio a un taux d'erreurs important), les retransmissions de paquets et les accusés de réception n'ajoutent qu'une robustesse à la couche MAC 802.11.

L'une des particularités du standard 802.11 est qu'il définit deux mécanismes d'accès fondamentalement différents au niveau de la couche MAC. Le premier est le DCF, qui correspond à une méthode d'accès assez similaire à celle des réseaux traditionnels supportant le Best-Effort. Le DCF a été conçu pour prendre en charge le transport de données asynchrones, dans lequel tous les utilisateurs qui veulent transmettre des données ont une chance égale d'accéder au support.

Le second mécanisme d'accès est le Point Coordination Function (PCF). Fondé sur l'interrogation à tour de rôle des terminaux, ou polling, sous le contrôle du point d'accès, la méthode PCF est conçue essentiellement pour la transmission de données sensibles, qui demandent une gestion de la QoS. PCF est utilisé pour les applications temps réel, telles que la voix ou la vidéo.

Un réseau en mode ad-hoc utilise uniquement le DCF, tandis qu'un réseau en mode infrastructure utilise à la fois le DCF et le PCF.

### 1.5.1 Distributed Coordination Function (DCF)

DCF est un mécanisme d'accès distribué à la couche MAC, il est basé sur le protocole CSMA/CA. L'accès au support est contrôlé par l'utilisation d'espaces intertrames, ou Inter-Frame Spacing (IFS), qui correspondent à l'intervalle de temps entre la transmission de deux trames. Les intervalles IFS sont des périodes d'inactivité sur le support de transmission. Les valeurs des différents IFS sont calculées par la couche physique.

Le standard définit quatre types d'IFS :

- Short IFS (SIFS) : c'est le plus petit des IFS, il est utilisé pour séparer les transmissions au sein d'un même dialogue (envoi de données, ACK, etc.).
- PCF IFS (PIFS) : est utilisé par le point d'accès pour accéder avec priorité au support. Le PIFS correspond à la valeur du SIFS, auquel on ajoute un temps. Le PIFS est calculé de la façon suivante :

$$PIFS = SIFS + Slotime \quad (1.1)$$

- DCF IFS (DIFS) : est utilisé lorsqu'une station veut commencer une nouvelle transmission. Il est calculé comme suit :

$$DIFS = SIFS + 2 \times Slotime \quad (1.2)$$

- Extended (EIFS) : est utilisé par les stations opérant en mode DCF. Il est supérieur au DIFS et est utilisé suite à un FCS (Frame Check Sequence) erroné.

Le standard définit trois types de trames (nommés aussi paquets), Figure 1.5 présente la constitution d'une trame générique MAC 802.11.

- les trames de données, utilisées pour la transmission des données.
- les trames de contrôle, par exemple RTS, CTS et ACK.
- les trames de gestion, pour l'échange d'informations de gestion au niveau MAC.

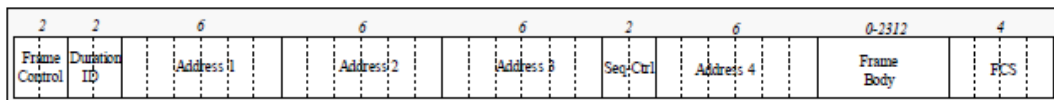


FIGURE 1.5 – Le format générique d'une trame MAC 802.11

Dans DCF (Figure 1.6), une station doit écouter le canal avant d'initialiser l'envoi d'un paquet. Si le canal est libre pendant un temps DIFS, la station peut transmettre son paquet. Les stations en écoute constatent une émission et déclencheront pour une durée fixée leur indicateur de Virtual Carrier Sense (VCS) (appelé NAV) et utiliseront cette information pour retarder toute transmission prévue.

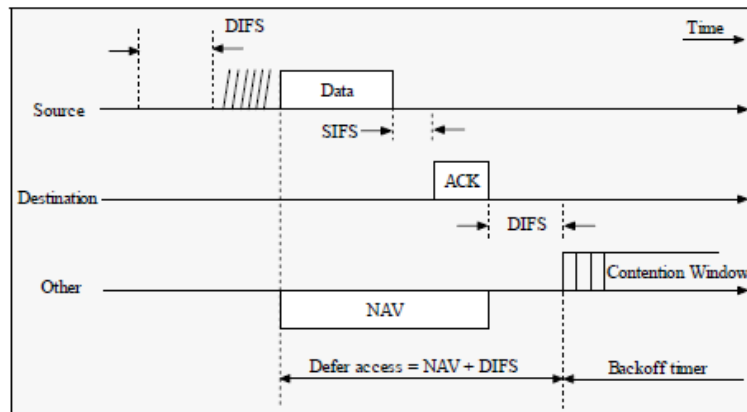


FIGURE 1.6 – Le mécanisme d'accès DCF (sans RTS/CTS)

En revanche, si le canal est occupé, alors la transmission est différée et le processus de backoff est initialisé. Une station calcule un intervalle de temps aléatoire appelé backoff timer uniformément distribué entre 0 et la taille actuelle de la fenêtre de contention  $CW$  moins un, équation (1.3).

$$Backoff\_timer = Random [0, CW-1] \times Slotime \tag{1.3}$$

Si le canal radio est libre, chaque station qui veut émettre, attend pendant DIFS et, commence ensuite à décrémenter le backoff timer. Elle continue à le faire tant que le canal radio est

libre. Une fois que le backoff timer a expiré, la station peut accéder au canal. Une collision peut avoir lieu si deux ou plusieurs stations ont commencé à transmettre en même temps, sinon un acquittement est envoyé à l'émetteur pour accuser la réception. Le récepteur attend pendant un temps SIFS après la réception correcte des données avant d'envoyer son ACK. Puisqu'un SIFS est plus petit qu'un DIFS, le récepteur n'a pas besoin d'écouter, préalablement le canal de transmission avant d'envoyer son acquittement. Si l'émetteur ne reçoit pas d'acquiescement, il considère que la trame envoyée a été perdue et doit la retransmettre, il entame donc un processus backoff à nouveau. Pour réduire la probabilité de collisions, après chaque échec de transmission, la fenêtre de contention est doublée (1.4) jusqu'à une valeur maximale prédéfinie  $CW_{max}$ . La fenêtre de contention est réinitialisée à une valeur minimale fixe  $CW_{min}$ , après chaque transmission avec succès.

$$CW = (CW_{min} \times 2^i) \quad (1.4)$$

Par ailleurs et, dans le but de résoudre le problème des stations cachées, le standard 802.11 définit sur la couche MAC un mécanisme optionnel de type RTS/CTS appelé mécanisme de VCS. Lorsque cette fonction est utilisée, une station émettrice transmet un RTS et attend en réponse un CTS. Toutes les stations du réseau recevant soit le RTS, soit le CTS, déclencheront pour une durée fixée leur indicateur NAV pour retarder toutes transmissions prévues (Figure 1.7). La station émettrice peut alors transmettre et recevoir son accusé de réception sans aucun risque de collision.

Le mécanisme RTS/CTS est particulièrement performant si la taille des paquets de données est grande. Or, si ces derniers sont petits alors le mécanisme RTS/CTS résultera d'une surcharge du réseau. Pour savoir si un échange RTS/CTS doit avoir lieu, le standard définit un seuil nommé  $RTS\_Threshold$ , si la taille de la trame est plus grande que ce seuil, alors un échange RTS/CTS doit être effectué avant l'envoi de la trame.

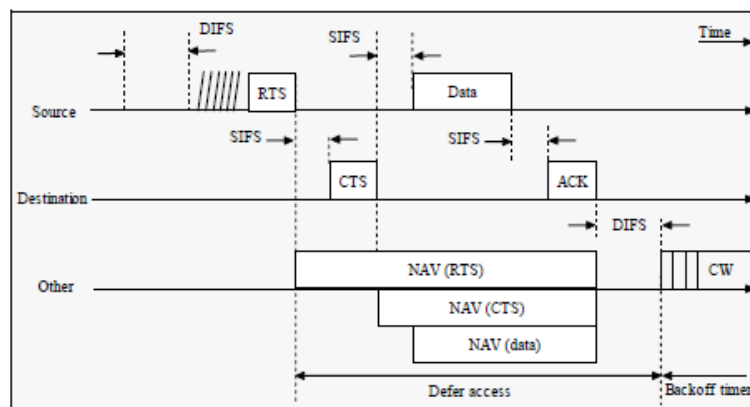


FIGURE 1.7 – Le mécanisme d'accès RTS/CTS

### 1.5.2 Point Coordination Function (PCF)

Dans le mode PCF, le point d'accès gère l'accès des stations au canal radio. Le temps est divisé en *Superframe* contenant chacune une période sans contention ou *Contention-Free Period* (CFP) suivi d'une période avec contention ou *Contention Period* (CP) comme illustré dans Figure 1.8. Pendant la période PCF, l'AP maintient une liste des stations enregistrées et interroge chaque station l'une après l'autre suivant sa liste. Aucune station n'a le droit de transmettre tant qu'elle n'a pas été interrogée.

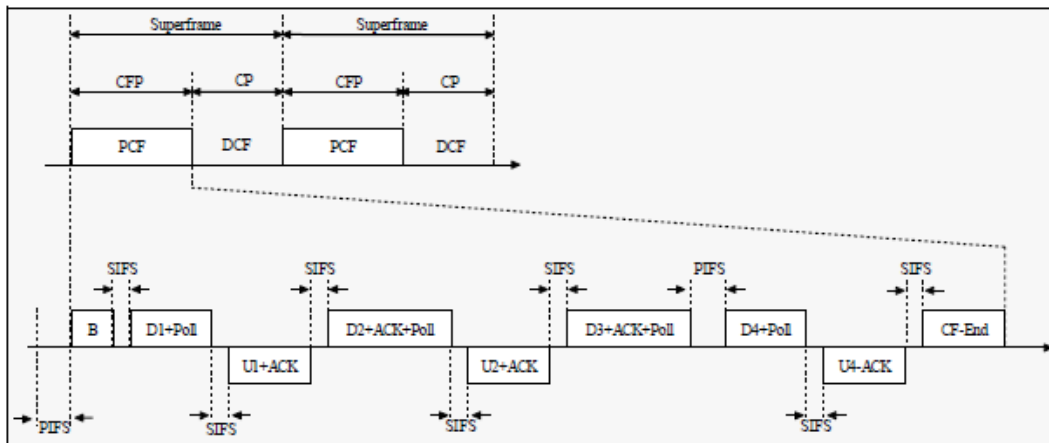


FIGURE 1.8 – Le mécanisme d'interrogation utilisé dans PCF

L'AP commence d'abord par écouter le canal pendant un intervalle PIFS, ensuite commence une période CFP en faisant un broadcast d'un signal Beacon. Toutes les stations rajoutent la *CFP\_Maxduration* (la durée maximale possible de la période CFP) à leur vecteur *NAV*, ce qui permet d'informer les stations que le réseau est sous contrôle du AP pendant une période CFP. L'AP peut mettre fin à la période CFP à n'importe quel moment en transmettant un paquet *CF-end*, ce qui peut arriver quand le réseau est légèrement chargé.

### 1.5.3 Fragmentation et Réassemblage

Dans les environnements radio, plus la taille d'une trame est importante, plus elle a de chance d'être corrompue. La fragmentation d'une trame en plusieurs trames de taille inférieure accroît la fiabilité de la transmission. Cette solution a pour effet de réduire le besoin de retransmettre des données dans de nombreux cas et d'augmenter ainsi les performances globales du réseau. Pour savoir si une trame doit être fragmentée, le standard 802.11 définit un seuil appelé *Fragmentation\_Threshold*, si la taille de la trame est plus grande que ce seuil, alors la trame est fragmentée. Les fragments ont une taille équivalente à la valeur du seuil *Fragmentation\_Threshold*, sauf pour le dernier, qui peut avoir une taille plus petite.

Quand une trame est fragmentée, tous les fragments sont transmis de manière séquentielle. Le support n'est libéré qu'une fois tous les fragments transmis avec succès ou lorsque la station source ne réussit pas à recevoir l'acquittement d'un fragment transmis. La station destination acquitte chaque fragment reçu avec succès en envoyant un ACK à la station source. La station source garde le contrôle du support pendant toute la durée de la transmission d'une trame en attendant un temps SIFS après la réception d'un ACK ou après la transmission d'un fragment. Si un ACK n'est pas correctement reçu, la station source arrête la transmission et essaie d'accéder de nouveau au support. Lorsque la station source accède au support, elle commence à transmettre à partir du dernier fragment non acquitté.

Si les stations utilisent le mécanisme *RTS/CTS*, seul le premier fragment envoyé utilise les trames *RTS/CTS* pour réserver le support. Les autres stations dans le *BSS* maintiennent leur *NAV* en extrayant l'information de durée de vie dans les différents fragments et *ACK*.

La trame est assemblée lorsque la station destination a reçu tous les fragments de la station source.

La Figure 1.9 illustre le processus suivi par l'émetteur pour transmettre une suite de fragments provenant d'une même trame.

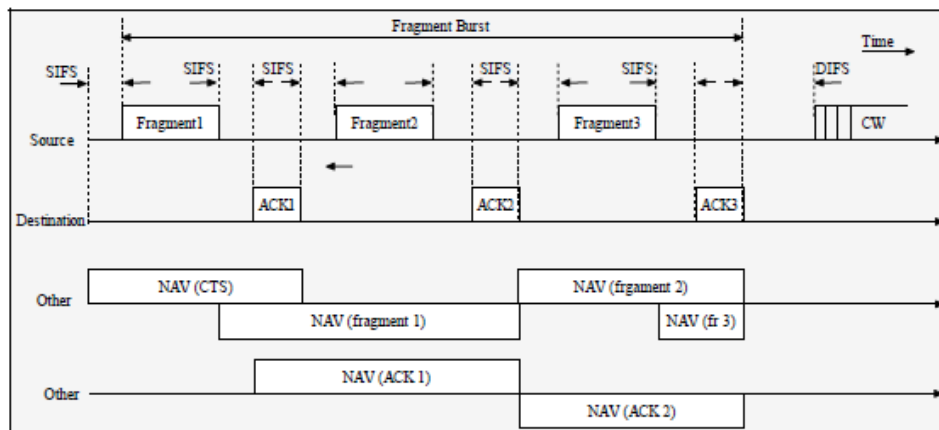


FIGURE 1.9 – Le mécanisme de fragmentation des paquets

## 1.6 Qualité de Service dans IEEE 802.11

Devant la nécessité d'introduire la QoS au niveau de la couche MAC du standard 802.11, le groupe de travail 802.11 a publié en 2005, sous le nom de 802.11e [02], un amendement au standard 802.11. Cet amendement définit un ensemble d'améliorations de la couche MAC pour le support de la QoS tout en gardant une rétrocompatibilité avec le standard 802.11. Les points d'accès et les stations qui implémentent ce nouveau standard sont appelés respectivement *QAP*

(*QoS-enhanced Access Point*) et *QSTA (QoS-enabled STAtion)*. 802.11e définit une nouvelle fonction de coordination appelée *HCF (Hybrid Coordination Function)*. Cette fonction utilise deux méthodes d'accès concurrentes, l'une basée sur la contention appelée *EDCA (Enhanced Distributed Channel Access)* et l'autre basée sur le contrôle par le point d'accès appelée *HCCA (HCF-Controlled Channel Access)*. Cette nouvelle architecture de la couche MAC dans 802.11e est illustrée dans la Figure 1.10.

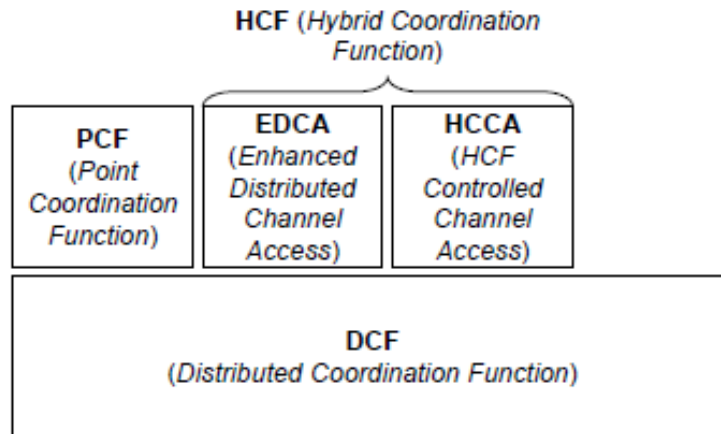


FIGURE 1.10 – L'architecture de la sous-couche MAC de 802.11e

Cependant, EDCA est le mécanisme d'accès de base dans 802.11e, alors que HCCA est optionnel. Dans ce qui suit, nous présentons les deux mécanismes d'accès en mettant plus d'accent sur le celui qui nous intéresse le plus, EDCA.

### 1.6.1 Enhanced Distributed Channel Access (EDCA)

EDCA représente une extension de la méthode d'accès DCF par l'introduction de la différenciation de services. EDCA différencie l'accès au médium en utilisant le principe des priorités. L'algorithme DCF n'a pas été modifié complètement dans EDCA, mais le jeu d'intervalle de temps sur lequel il se repose a été personnalisé pour chaque priorité. Ainsi ces intervalles de temps sont ajustés afin d'augmenter/diminuer la probabilité d'accès au canal et ainsi favoriser/défavoriser la transmission de données des flux de haute/faible priorité.



Priority	User priority	802.1D Designation	Access Category	Designation
Lowest	1	BK (Background)	$AC\_BK$	Background
	2	- (Spare)	$AC\_BK$	Background
	0	BE (Best Effort)	$AC\_BE$	Best Effort
	3	EE (Excellent Effort)	$AC\_BE$	Best Effort
	4	CL (Controlled Load)	$AC\_VI$	Video
	5	VI (Video)	$AC\_VI$	Video
Highest	6	VO (Voice)	$AC\_VO$	Voice
	7	NC (Network Control)	$AC\_VO$	Voice

TABLE 1.1 – Relation entre les priorités et les catégories d'accès dans EDCA

Dans EDCA le support de la QoS est réalisé par le biais de l'introduction de plusieurs *Access Categories (ACs)* au niveau de chaque *QSTA*. EDCA définit quatre *ACs* où chaque *AC* correspond à un niveau de priorité et pouvant être utilisé par un type de trafic. Pour faciliter le choix des *ACs* à utiliser avec le type du trafic, le groupe 802.11e a proposé une table de correspondance entre les spécifications IEEE 802.1D (Tableau 1.1) et les *ACs* de IEEE 802.11e [01].

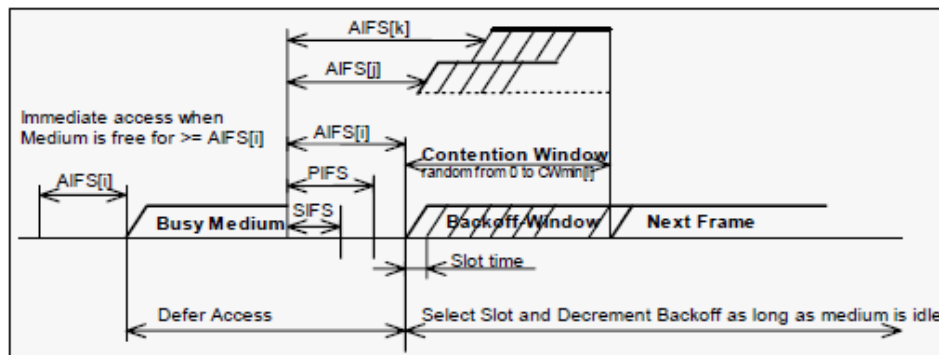


FIGURE 1.11 – Le mécanisme d'accès EDCA

Par ailleurs chaque *AC* est une variante améliorée du protocole DCF, qui comme le montre la Figure 1.11 rivalise pour l'obtention d'une opportunité de transmission ou *transmission opportunity (TXOP)* en utilisant un ensemble de paramètres d'accès au canal. Cet ensemble est préalablement défini par EDCA et contient les paramètres suivants :

**La valeur minimale de la fenêtre de contention  $CWmin[AC]$**  : la valeur  $CWmin$  est différente pour chaque *AC*, ainsi une petite valeur permet à une classe plus prioritaire d'obtenir plus de *TXOP* qu'une classe moins prioritaire.

**La valeur maximale de la fenêtre de contention  $CWmax[AC]$**  : similairement à  $CWmin$ , cette valeur est définie pour chaque *AC* suivant sa priorité.

**L'espace inter-paquet ou *Arbitrary Inter frame Space AIFS[AC]*** : Chaque *AC* fait appel à la procédure de *Backoff* après que le canal soit libre pour une période égale à  $AIFS[AC]$  plutôt que *DIFS*. La valeur du  $AIFS[AC]$  est calculée comme suit :

$$AIFS[AC] = SIFS + AIFSN[AC] \times Slotime \quad (1.5)$$

où  $AIFSN$  est un nombre déterminé pour chaque *AC*,  $AIFSN[AC] \geq 2$ . Voir le Tableau 1.2.

***TXOPLimit[AC]*** : après qu'une station ait gagné un *TXOP*, elle est autorisée à transmettre consécutivement un nombre de paquets (burst de paquets) appartenant au même *AC* (Figure 1.12). Le temps d'attente entre la réception d'un ACK pour un paquet  $i$  et l'envoi du paquet  $i+1$  est SIFS. Le paramètre *TXOPLimit* dans ce cas spécifie la limite du nombre de paquet à transmettre dans ce burst. Il est à noter que ce paramètre est optionnel dans EDCA, et s'il n'est pas activé, alors chaque station est autorisée à transmettre un seul paquet à la fois.

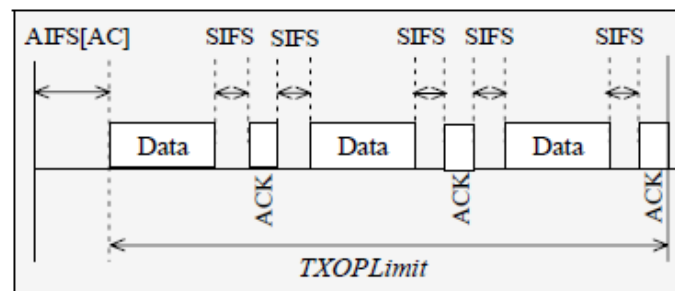


FIGURE 1.12 – Un burst de paquet contrôlé par *TXOPLimit*

**La collision Virtuelle** : il peut arriver que dans une station, deux *backoff timer* correspondant à deux *AC* expirent au même moment, causant ainsi une collision virtuelle. Dans ce cas, le scheduler de la couche MAC 802.11e résout cette collision virtuelle en allouant le *TXOP* à l'*AC* le plus prioritaire. Similairement à une collision dans le canal, les autres *AC* feront appel à la procédure de backoff et retarderont leur transmission (Figure 1.13).

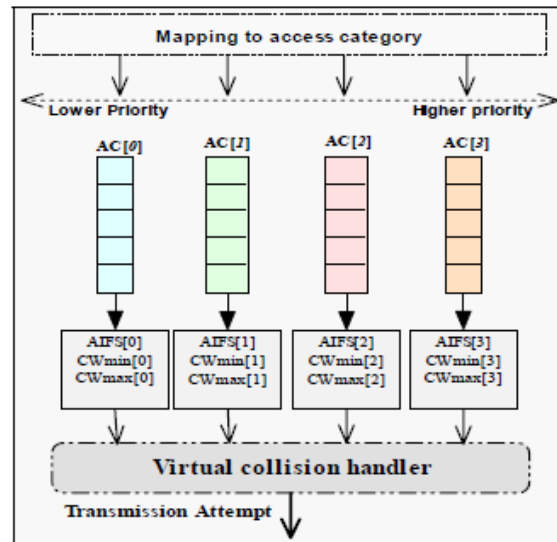


FIGURE 1.13 – Virtuel Backoff des 4 classes de trafic

La Tableau 1.2 contient les valeurs par défaut de ces paramètres de différenciation :

AC	CWmin	CWmax	AIFSN	TXOPLimit		
				DS_CCK	Extended Rate/OFDM	Other
AC_BK	CWmin (32)	CWmax(1024)	7	0	0	0
AC_BE	CWmin	CWmax	3	0	0	0
AC_VI	(CWmin)/2	CWmin	2	6016 $\mu$ s	3008 $\mu$ s	0
AC_VO	(CWmin)/4	(CWmin)/2	2	3264 $\mu$ s	1504 $\mu$ s	0

TABLE 1.2 – Les paramètres de différenciation par défaut d’EDCA

### 1.6.2 Hybrid coordination function Controled Channel Access (HCCA)

Bien que EDCA améliore considérablement le mécanisme DCF, il reste néanmoins incapable de garantir une stricte protection des ACs prioritaires, particulièrement si le réseau est surchargé [01]. Pour pallier à cette limitation, le groupe 802.11e définit un mécanisme optionnel basé sur l’interrogation (HCCA). Comme PCF, HCCA utilise une station centrale *Hybrid Coordinator* (HC), généralement le point d’accès, qui a pour tâche de diriger le trafic. Après une période PIFS, le HC prend possession du canal, et alloue les HCCA *TXOPs* aux *QSTA*. Contrairement à PCF, le HC peut interroger les *QSTAs* pendant les deux périodes (CP, CFP) en prenant en compte les contraintes du trafic de la *QSTA*.

La Figure 1.14, montre les différentes périodes utilisées sous HCCA. Il est à noter que le temps où le HC contrôle l’accès au canal est le Controled Access Period ou la période du contrôle

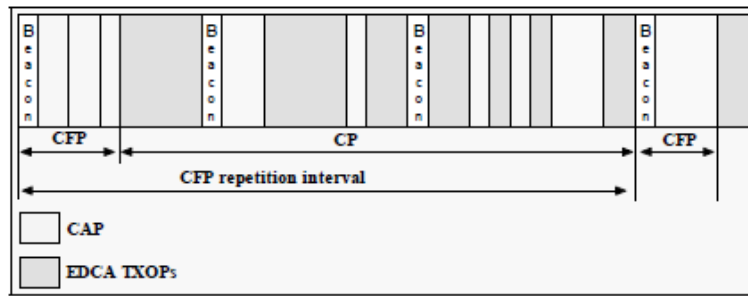


FIGURE 1.14 – Les périodes CAP/CFP/CP du HCCA

de l'accès au canal (CAP). De plus, le CAP ne contient pas seulement la CFP mais également des périodes du CP. Après la prise de contrôle du canal, le HC interroge les *QSTA* inscrites dans sa liste de station à interroger ou *Polling list*. Chaque *QSTA* voulant s'inscrire dans cette liste, envoie un QoS reservation par le biais d'un paquet de contrôle ou management frame. Bien que le HC désigne la *QSTA* à émettre en utilisant les caractéristiques des flux, les *HCCA TXOP* sont attribuées pour la *QSTA* plutôt que pour le flux. Par conséquent, c'est à la *QSTA* d'allouer ce *HCCA TXOP* à l'un de ses flux.

### 1.6.3 Autres paramètres de QoS définis par l'amendement 802.11e

Parallèlement à EDCA et HCCA, le draft 802.11e a introduit d'autres paramètres pour la gestion de la QoS [01] :

- **Les blocs d'acquittements ou Block acknowledgement (block ACK)** : Le bloc d'acquittement permet à une *QSTA* d'envoyer une succession de paquets séparés par un SIFS. La station réceptrice n'envoie un ACK qu'après la réception de l'ensemble des paquets. Par le biais de l'envoi d'un seul ACK pour un ensemble de paquet, le block d'acquittements permet de diminuer la charge introduite par le renvoi d'un ACK pour chaque paquet.

- **Le lien directe ou Direct Link Protocol (DLP)** : *DLP* permet à deux stations associées au même *QAP* d'établir des transmissions sans passer par ce dernier. Ce mécanisme permet une meilleure utilisation du canal étant donné que les communications ne passent pas par le *QAP*.

- **Pas d'acquittement (No ACK)** : Pour certain type d'application, 802.11e permet de ne pas utiliser les paquets d'acquittements (ACK). Cette possibilité est très utile pour les applications qui d'une part ont des contraintes temporelles très strictes; et d'autre part de faibles contraintes de fiabilité.

## 1.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la technologie la plus utilisée et la plus commercialisée dans les réseaux locaux sans fil, la norme IEEE 802.11, qui est d'ailleurs soutenue par la majorité des opérateurs.

Cependant, l'inconvénient principal de ces réseaux est lié au type et à l'utilisation du canal de communication. En capacités limitées, il doit être partagé entre les stations mobiles de façon équitable, ce qui engendre une dégradation des performances surtout dans le cas des flux multimédia (VoIP et Video). La diversité de l'information transmise a motivé l'apparition de nouveaux mécanismes afin d'apporter davantage de robustesse dans le fonctionnement du réseau. Ces exigences ont été regroupées sous le concept de QoS.

En effet, le mécanisme de base d'accès au canal DCF, ne supporte que les services de type Best-Effort, qui ne requiert aucune garantie de QoS, car il offre à toutes les stations et à tous les flux de la même station les mêmes priorités d'accès aux ressources et au canal. À l'avènement de l'amendement 802.11e, le mécanisme de base DCF dans 802.11 a été remplacé par EDCA. Ce dernier a introduit un certain degré de différenciation entre les différents types de trafic et supporté des flux qui nécessitent une QoS.

# 2

## Synthèse sur les travaux existants, motivations et problématique

### 2.1 Introduction

Au cours de ces dernières années, un grand nombre d'études a été réalisé dans la littérature, dans le but d'évaluer et d'analyser la performance du protocole IEEE 802.11e-EDCA. L'intérêt de ces travaux a été de prédire les métriques de performance afin de les utiliser dans le contrôle d'admission, ou de mieux comprendre le comportement de ce protocole dans les différentes situations et configurations.

La problématique commune provient du fait que la majorité de ces modèles ont utilisé le modèle de Bianchi [28] (un modèle analytique proposé pour DCF qui suppose que le canal de transmission est parfait), et pour l'adapter au mécanisme EDCA, ils l'ont simplement modifié pour la prise en considération de la différenciation de services. Malheureusement, plusieurs caractéristiques de la nouvelle procédure EDCA ont été ignorées comme le mode de transmission en burst (TXOPlimit).

Dans ce chapitre, nous présenterons, dans la section 2.2, les principaux travaux d'évaluation des performances du protocole IEEE 802.11e-EDCA. Dans la section 2.3, nous exposerons les

problématiques de transmission radio et leur impact sur la qualité du signal. Nous présenterons dans la section 2.4, les critiques liées aux modèles analytiques existants et les motivations qui nous ont permis de définir l'orientation de notre projet. Dans la section 2.5, nous situerons notre objectif d'évaluation et proposerons notre modélisation analytique du protocole IEEE 802.11e-EDCA.

## 2.2 Modèles analytiques existants

Dans le but de modéliser le mécanisme d'accès 802.11e-EDCA et d'en évaluer la performance, plusieurs travaux se sont intéressés à la proposition de modèles analytiques de comportement EDCA : [09], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [31]. Les principaux modèles sont des modèles en chaîne de Markov représentant le comportement d'une catégorie d'accès EDCA vis à vis de son environnement. Ces modèles sont essentiellement basés sur le modèle de DCF proposé par Bianchi [28]. Les plus marquants sont celui de Zhu, Xiao et Kong, au plus récent (2012) Yao.

### 2.2.1 Modèle de G.Bianchi et son évolution

Bianchi [28] a proposé un modèle analytique simple basé sur une chaîne de Markov à deux dimensions pour modéliser le processus de backoff et prédire le comportement du mécanisme DCF. Ce modèle avait pour but d'estimer le débit effectif d'un réseau saturé, avec un nombre de stations fixe et sous l'hypothèse d'un canal idéal (c'est à dire que la seule raison pour qu'un paquet transmis ne soit pas correctement reçu est une collision réelle).

Pour améliorer le modèle de Bianchi [28], Wu [29] a étendu la chaîne de Markov pour prendre en compte la caractéristique de la limite de retransmission (Retry Limit). Ziouva dans [30] a introduit un nouveau état de transition dans la chaîne de Markov de Bianchi [28] dans le but d'introduire la caractéristique de suspension du compteur de backoff, intégrant aussi la probabilité de blocage (freezing) du compteur de backoff suite à une détection d'occupation du canal.

### 2.2.2 Modèles analytiques pour EDCA

Dans ce qui suit, nous allons présenter les modèles analytiques d'EDCA, que nous estimions intéressants pour apercevoir et bien comprendre notre proposition.

**Zhu and Chlamtac [18]** : ils ont gardé l'aspect bidimensionnel du modèle originel, et pour l'adapter au 802.11e-EDCA, ils ont repris la chaîne de Markov de Bianchi [28] en ajoutant

la limite de retransmission pour faire la différenciation par *CW*. La différenciation par *AIFS* a été introduite par l'ajout du temps d'attente *AIFS* dans le calcul du temps de transmission.

**Y. Xiao [12]** : il a étendu la chaîne de Markov de Bianchi [28] à une chaîne de Markov à trois dimensions. Cependant, la première dimension est toujours constante et elle a pour valeur le numéro de l'AC étudiée. le modèle de [12] est tout simplement un modèle de Bianchi amélioré pour l'analyse de la différenciation par *CW*, la différenciation par *AIFS* et la suspension du compteur de backoff quand le canal est occupé.

**K. Xu, Q. Wang and H. Hassanein [16]** : les auteurs ont proposé un modèle analytique pour EDCA à base d'une chaîne de Markov multidimensionnel, où le nombre de dimensions dépend du nombre de flux actifs dans le réseau. Il est bien clair qu'une telle approche souffre d'une complexité croissante. De plus, plusieurs aspects du protocole n'y sont pas traités, comme la limite de retransmission, et la suspension du compteur de backoff. La différenciation par *AIFS* n'est pas faite aussi, par contre celle par *CW* est bien réalisée.

**J.W. Robinson and T.S. Randhawa [23]** : étudie en détail l'effet de la période de post collision par l'introduction des probabilités de transmission spécifiques aux différentes zones de contention *CW* causées par la différence entre les valeurs des différents *AIFS*. Cependant, ce modèle décompose la chaîne de Markov en plusieurs parties, chaque partie représente une caractéristique donnée (une pour le backoff, et une autre pour les zones de contention). Ainsi, uniquement deux *ACs* sont considérés. Donc, l'extension du modèle au cas général où toutes les *ACs* seront actives dans la même station n'est pas évidente et rend le modèle complexe.

**Z. Kong, D.H.K. Tsang, B. Bensaou and D. Gao [20]** : ils ont mis le focus sur la possibilité de suspension répétée du compteur de backoff d'une station suite à des transmissions consécutives multiples des autres stations. Ils ont essayé de modéliser la caractéristique de suspension du backoff et la différenciation par *AIFS* par l'ajout d'une troisième dimension à la chaîne de Markov. Contrairement aux autres modèles, le modèle de [20] couvre un grand nombre de caractéristiques d'EDCA (Collision virtuelle, limite de retransmission, suspension du backoff).

**Y.C. Yao, J.H. Wen and C.E. Weng [31]** : dans ce modèle, Yao prend les points forts des trois approches de modélisation analytique les plus aboutissantes, [12], [18] et [30] et essaie de les combiner ensemble pour obtenir un modèle unifié valide et non complexe pour EDCA. Cependant, [31] a utilisé la même chaîne de Markov que celle de Bianchi [28], en



intégrant le nouveau état de transition qu'introduit Ziouva dans [30] pour la suspension du compteur de backoff, et la probabilité d'occupation du canal. En effet, il a repris la troisième dimension de Xiao [12] pour prendre en considération toutes les *ACs* dans la modélisation et en faire la différentiation par *CW*. La différentiation par *AIFS* a été introduite dans le calcul du temps de transmission, comme initié dans [18] par Zhu.

## 2.3 Problématiques et caractéristiques des liens radios

La nature du canal radio suscite un certain nombre de problèmes qu'on ne rencontre pas dans le monde filaire. En effet, les ondes radio se propagent dans l'air plutôt que dans un câble protégé, ce qui induit à l'apparition de plusieurs phénomènes liés à cette propagation. Ces différents phénomènes affectent la qualité du signal transmis, en augmentant le taux d'erreur binaire (BER). Ainsi, si le nombre d'erreurs est suffisamment faible pour autoriser leur correction, le décodage des informations est possible et les données sont transmises avec succès ; dans le cas contraire les données seront considérées comme erronées.

### 2.3.1 Opération Half-Duplex

Dans un réseau sans fil, il est difficile pour une station sans fil d'émettre et de recevoir des données en même temps. Lorsqu'une station est en cours d'émission, le signal émis se propage dans toutes les directions affectant, ainsi, le chemin pris par le signal reçu. Ce phénomène est plus connu sous le nom d'auto interférence ou self-interference. Sachant que la puissance du signal transmis est beaucoup plus forte que celle reçue, ce dernier (signal reçu) est recouvert par le signal émis. Par conséquent, la station émettrice est incapable de distinguer le signal reçu, rendant le système utilisé par Ethernet (le système Ethernet consiste à émettre et écouter le canal afin de détecter les collisions) inapplicable aux réseaux sans fil.

### 2.3.2 Phénomènes de variation du canal sans fil

Lors de sa propagation dans l'air, le signal radio subit plusieurs perturbations dépendantes du lieu ainsi que du milieu traversé. Nous pouvons citer en particulier : plusieurs chemins possibles ou multipath, une atténuation du signal due aux bruits et des interférences dans le canal.

#### a) Multipath :

Le signal radio se propage dans l'air dans toutes les directions de l'espace et se réfléchit contre différents obstacles, comme des bâtiments ou tout simplement les murs, le sol, etc... (Figure

2.1). Ces différentes instances du signal parcourent différentes distances avant d'atteindre la destination, et peuvent ainsi arriver déphasées et atténuer la qualité du signal initial.

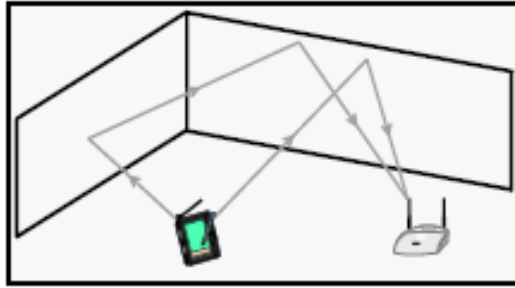


FIGURE 2.1 – Multipath

### b) Atténuation du signal :

Les signaux radio subissent un affaiblissement en fonction de la distance qu'ils parcourent et des milieux qu'ils traversent. En espace libre, c'est-à-dire sans obstacle, nous pouvons considérer qu'un signal émis avec une puissance  $P_t$  (en Watts) sera reçu à une distance  $d$  (en mètres) avec une puissance  $P_r$  (en Watts) donnée par l'équation de *Friis* en espace libre :

$$P_r(d) = G_t \cdot G_r \cdot \frac{\lambda}{L \cdot (4 \cdot \pi \cdot d)^2} \quad (2.1)$$

Où  $G_t$  et  $G_r$  sont les gains des antennes émettrice et réceptrice,  $L$  est le facteur de perte hors propagation dans le système et  $\lambda$  est la longueur d'onde (en mètres) du signal. La puissance du signal décroît en fonction du carré de la distance.

### c) Bruit et interférences :

Outre l'affaiblissement dû au milieu traversé et à la distance parcourue, le signal est aussi perturbé par différentes sources de bruit. Dans une bande de fréquence de largeur  $B$  (Hertz), à une température de  $T$  (Kelvin), nous considérons qu'à cause de l'agitation aléatoire des électrons dans les circuits du récepteur, un bruit thermique blanc de puissance  $P_N = k \cdot T \cdot B$  perturbe tout signal,  $k$  étant la constante de Boltzmann ( $k = 1.379 \cdot 10^{-23}$  (W/Hz.K)).

Néanmoins, les principales causes de perturbations pouvant altérer un signal sont issues des autres signaux émis dans la même bande de fréquence. Les signaux émis simultanément par plusieurs stations vont s'entremêler et devenir difficiles ou impossible à décoder.

Il est à noter que le critère pour qu'un signal soit accepté par la couche physique d'un récepteur est nommé *SNR* (*Rapport signal sur bruit*), sa valeur est calculée et comparée à un seuil  $SNR_{threshold}$ . Son expression est la suivante :

$$SNR = \frac{P_r}{P_N + \sum P_{Autres-Signaux}} \quad (2.2)$$

Cette valeur, en effet limite la réutilisation spatiale, c'est-à-dire la possibilité d'effectuer deux transmissions simultanées sans qu'elles n'interfèrent.

### 2.3.3 Rafales d'erreurs dans le canal

Le résultat des variations de l'état du canal sans fil est l'augmentation du taux d'erreurs binaires dans les transmissions sans fil. Contrairement au réseau filaire où le BER ne dépasse pas les  $10^{-6}$ , les réseaux sans fil affichent un taux supérieur ou égal à  $10^{-5}$ .

**BER (Taux d'erreurs par bit)** : C'est le taux d'erreurs mesuré à la réception numérique indiquant le niveau d'atténuation et/ou perturbation de la puissance du signal. Ces erreurs sont celles, remontées à la couche MAC par les couches inférieures (PMD et PLCP), qui n'ont pas pu être corrigées, malgré la technique de codage et les auto-corrrections. Par exemple, pour la modulation OFDM, le taux d'erreurs par bit ( $BER_{OFDM}$ ) est calculé comme suit :

$$BER_{OFDM} = \frac{7}{12} \cdot Q\left(\sqrt{\frac{2}{7} \cdot \frac{E_b}{N_0}}\right) + \frac{1}{2} \cdot Q\left(3 \cdot \sqrt{\frac{2}{7} \cdot \frac{E_b}{N_0}}\right) \quad (2.3)$$

Où  $E_b/N_0$  est le rapport de l'énergie par bit ( $E_b$ ) sur la densité spectrale du bruit ( $N_0 = P_N \cdot N_f$ ), où  $N_f$  est la valeur du bruit du circuit.  $Q$  étant la fonction de Marcum.

**PER (Taux d'erreurs par paquet)** : Il représente la proportion erronée dans un paquet de données. La formule suivante montre qu'il est en relation avec le BER et la taille des paquets de données :

$$PER = 1 - (1 - P_e^{PLCP}) \cdot (1 - P_e^{payload}) \implies P_e = 1 - (1 - BER)^L \quad (2.4)$$

Où  $P_e^{PLCP}$  et  $P_e^{payload}$  sont les probabilités d'erreurs pour le PLCP et la charge utile du paquet respectivement et  $L$  c'est la taille en bit de l'entête PLCP ou la charge utile du paquet de données.

Généralement, les techniques utilisées pour faire face à ces rafales sont :

- ✓ L'utilisation de paquets avec des petites tailles.
- ✓ Les blocs correcteurs d'erreurs ou Forward Error Control(FEC).

✓ Les procédures de retransmission.

## 2.4 Etude critique sur l'existant et motivations

Il existe donc un grand nombre de modèles analytiques pour analyser le mécanisme d'accès 802.11e-EDCA dans la littérature, chacun de ces modèles possède ses apports et ses améliorations par rapport aux précédents. En même temps, chacun de ces modèles souffre de ses propres limitations. Tous ces modèles cherchent en fait à obtenir une bonne approximation du débit atteignable par  $AC$  et/ou son délai d'accès au canal. Néanmoins, plusieurs questions restent encore posées :

- Est ce que ces modèles fournissent une bonne compréhension du comportement du protocole EDCA ? Reflètent-ils correctement son fonctionnement et prédisent-ils fidèlement ses performances ?
- Est ce que ces modèles sont complets et peuvent-ils être appliqués à toutes les situations et configurations ?
- Lequel de ces modèles est capable de donner la meilleure estimation de métriques de performances ?

L'étude décrite dans la section (2.2) montre clairement que tous ces modèles, malgré qu'ils soient nombreux, ne sont pas complets en ce qui concerne la prise en considération de tous les paramètres de différenciation EDCA ( $CW_{min}$ ,  $CW_{max}$ , AIFS, TXOPlimit, Collision virtuelle). Aucun de ces modèles analytiques ne prend en compte, de façon explicite, le paramètre de différenciation TXOPlimit et son impact sur la QoS et les performances de 802.11e. Cependant, dans ces modèles, il est supposé que, une fois qu'une  $AC$  accède au canal, elle transmet une et une seule trame de donnée. Autrement dit, tous ces modèles sont conçus avec l'hypothèse que le paramètre de différenciation TXOPlimit est égal à zéro pour toutes les  $ACs$ , ou que le mode CFB (transmission en burst pendant la limite TXOP) est désactivé. Hormis quelques études par simulation [32], [33], [34], [35] du mode CFB, qui démontrent par contre, que le paramètre de différenciation TXOPlimit a une influence non négligeable sur la performance du réseau. Dès lors, une bonne modélisation de cette caractéristique est importante lors de la proposition d'un modèle analytique complet pour EDCA.

La plupart voire tous les modèles analytiques d'évaluation des performances du protocole 802.11e-EDCA qui reposent sur le modèle de Bianchi [28], assument des conditions que le canal de transmission radio est idéal (pas d'erreurs de transmission). Or cette hypothèse n'est pas valable dans un réseau sans fil, et leurs modèles fournissent des résultats non applicables et

inutilisables dans certaines situations, car l'environnement radio affecte beaucoup la qualité du signal transmis.

Les principaux facteurs qui peuvent engendrer la perte d'un paquet de données sont la nature du milieu de propagation des ondes électromagnétiques et la présence des bruits et/ou des interférences qui affaiblissent et perturbent le signal radio. A la réception de ce signal, le taux d'erreurs par bit BER sera élevé, par conséquent, le taux d'erreurs par paquet PER augmente (voir l'expression 2.4) et cela peut entraîner des retransmissions, sachant qu'une retransmission signifie que l'occupation du canal pour la transmission précédente est inutile vis-à-vis du réseau. En effet, dans le cas où le taux d'erreur par bit BER est important, le fait d'envoyer des paquets de grande de taille rend la probabilité qu'ils soient erronés plus importante. Pour diminuer le risque de devoir retransmettre un paquet suite à une erreur et afin d'améliorer les performances du protocole, le mécanisme de fragmentation PFM (Packet Fragmentation Mechanism) permet de diminuer la dimension des paquets en les fractionnant en petits fragments [36].

A cet effet, aucune de ces études ne s'est intéressée à proposer ou au moins à évaluer ce mécanisme déjà existant et son impact sur les performances du protocole 802.11e-EDCA en présence des erreurs de transmission et notamment en considération du paramètre de différenciation TXOPlimit.

Nous concluons de cette étude que l'introduction d'une caractéristique manquante dans un modèle entraîne une validité supérieure du modèle résultant et conduit à des résultats plus précis comme démontré dans [29], [30].

## 2.5 Proposition

Dans cette étude, au premier lieu, notre objectif est de montrer et d'évaluer l'influence du mode de transmission en burst dans le mécanisme d'accès EDCA par l'intermédiaire du paramètre de différenciation TXOPlimit, et de proposer un modèle analytique simple susceptible d'être incorporé facilement à un modèle plus global pour EDCA. Au deuxième lieu, nous nous intéressons à l'analyse de la dégradation des performances d'EDCA et la déficience du mode CFB, sous l'effet d'un canal bruité ou non idéal (implication des paramètres BER, PER et la taille du paquet de données), ainsi nous proposons le mécanisme de fragmentation (PFM) et nous évaluons son niveau d'amélioration qu'il peut procurer pour réduire l'influence de ces paramètres sur les performances de ce protocole dans de telles circonstances et phénomènes réelles.

Pour atteindre notre objectif, nous choisissons de mener notre étude à l'aide de la modélisation analytique stochastique où nous proposons de modéliser analytiquement le mécanisme d'accès EDCA du standard IEEE 802.11e avec considération du taux d'erreurs par paquet, le

paramètre de différentiation TXOPlimit et le mécanisme de fragmentation. Notre modélisation sera essentiellement considérée comme une extension du modèle récent donné par Yao dans [31].

Cette approche nous permettra d'analyser le comportement du protocole EDCA avec des scénarios complexes et sous des conditions extrêmes et d'obtenir des résultats exacts très rapidement.

## 2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons réalisé une synthèse sur les principaux travaux d'évaluation de performances du mécanisme d'accès EDCA du standard IEEE 802.11e existants dans la littérature. Nous avons cité quelques modèles analytiques que nous jugeons contributifs et aboutissants en terme d'évolution pour la prise en considération de la différentiation du service et l'adaptation des nouvelles procédures EDCA.

L'analyse critique que nous avons effectuée sur les modèles existants, a montré clairement l'insuffisance et les limitations dont souffrent ces derniers. Ceci est dû, d'une part, au fait que ces modèles dans leur totalité, négligent la modélisation d'un des paramètres de base d'EDCA. Il s'agit de TXOPlimit qui est l'un des trois paramètres de différentiation des catégories d'accès qui influe considérablement sur la performance globale du réseau. D'autre part, la majorité des modèles s'inspirent principalement du modèle de Bianchi [28] qui suppose un canal de communication idéal ; or des modèles de propagation des ondes électromagnétiques et le rapport signal sur bruit prouvent que la qualité du signal est fortement affaiblie et perturbée à la réception par l'augmentation du taux d'erreur par paquet.

Pour tout cela, nous avons proposé d'initier le travail d'évaluation de performances du protocole IEEE 802.11e-EDCA, prenant en considération le paramètre de différentiation TXOPlimit, sous l'influence des paramètres du taux de perte (BER, la taille des paquets) ainsi que l'intégration du mécanisme de fragmentation (PFM). Pour ce faire, nous avons choisi de mener le travail à l'aide de la modélisation stochastique par chaînes de Markov.

# 3

## Modélisation analytique du protocole d'accès IEEE 802.11e-EDCA

### 3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous détaillerons notre proposition d'un modèle analytique global pour le mécanisme d'accès EDCA du standard IEEE 802.11e, capable d'estimer les métriques de performance dans les conditions de saturation.

Notre modélisation repose sur une chaîne de Markov à deux dimensions, telle qu'elle est initiée par Bianchi dans [28], et s'inspire du modèle de Yao [31] pour une propre modélisation pour chacune des quatre catégories d'accès EDCA. L'apport de notre modèle est l'intégration du paramètre de différenciation TXOPlimit, avec considération du mécanisme de fragmentation et le taux d'erreurs par fragment.

Nous aborderons notre modélisation par une description générale, dans la section 3.2, qui englobera des hypothèses indispensables et la méthodologie à suivre pour déterminer les expressions des mesures de performances. Dans la section 3.3, nous donnerons les détails de notre modèle qui est constitué d'une chaîne de Markov associée à chaque catégorie d'accès et sa

résolution. Finalement, une analyse sur les événements du canal sera faite pour développer l'expression du débit de saturation du réseau.

## 3.2 Description générale du modèle

Avant de présenter notre modèle mathématique détaillé, nous présenterons les éléments indispensables à la modélisation analytique d'EDCA.

### 3.2.1 Hypothèses du modèle

Dans le but de spécifier le contexte dans lequel notre modèle est applicable, nous assignons les hypothèses suivantes :

1. Le modèle suppose que le nombre de stations physiques actives est bien connu, soit  $n$  ce nombre. Toutes les stations sont placées dans la même proximité radio ;
2. Dans chaque station physique, les quatre catégories d'accès sont actives en même temps ;
3. Chaque station virtuelle  $h$  (station physique à l'envoi de données de la catégorie d'accès  $h \in (BK, BE, VI, VO)$ ) a un taux de transmission identique,  $\tau[h]$  (probabilité qu'une station transmette un paquet de données du flux  $h$  dans un slot de temps donné) ;
4. Le taux de transmission global  $\tau$  est identique pour toutes les stations physiques ;
5. Probabilité de collision  $P[h]$  est constante pour toutes les stations virtuelles de la catégorie  $h$ , et indépendante du nombre de retransmissions.  $P[h]$  est propre à chaque catégorie ;
6. On suppose avoir un environnement physique non-idéal (l'effet du BER est pris en compte), en conséquence, la perte d'un paquet peut être due à une collision ou à une erreur sur le paquet ;
7. Nous considérons la région de saturation, ceci se traduit par l'hypothèse que toutes les files d'attente des quatre ACs possèdent suffisamment de données à transmettre à la fin de chaque transmission (files d'attente toujours pleines) ;
8. Le temps de propagation du signal n'est pas négligeable.

### 3.2.2 Métriques de performance

Un grand nombre de métriques peut être défini pour évaluer la performance du réseau 802.11e, afin de comprendre son comportement et caractéristiques critiques. Dans notre étude d'évaluation, les métriques que nous jugeons primordiales et significatives pour l'analyse du comportement du IEEE 802.11e-EDCA sont le débit atteignable global du réseau et le débit



atteignable par chaque catégorie d'accès d'une station virtuelle. Car le but du mécanisme d'accès EDCA est de maximiser la quantité d'informations à transmettre dans le réseau tout en garantissant les besoins de QoS des applications multimédia. Bien entendu, une rigide différenciation de service entre les catégories d'accès.

**Débit atteignable global :** Il représente la quantité de données utiles (charge utile) transmises avec succès dans un slot de temps complet. Il est défini par la somme des débits atteignables de toutes les catégories d'accès.

**Débit atteignable par une catégorie d'accès  $h$  :** Il représente la quantité de données utiles de la catégorie d'accès  $h$  transmises avec succès dans un slot de temps complet. Nous le déterminerons après l'obtention du taux de transmission par une catégorie  $h$  ( $\tau[h]$ ) en appliquant une analyse sur les événements du canal.

### 3.2.3 Paramètres du modèle

Les paramètres importants de notre modélisation sont représentés dans le tableau suivant :

Paramètre	Signification
$n$	Nombre de stations physiques dans le réseau
$m[h]$	Étage maximal du Backoff de l' $AC_h$ (étage où la fenêtre de contention ne sera pas doublée lors d'une retransmission)
$W_0[h]$	Taille minimale de la fenêtre de contention de l' $AC_h$
$W_m[h]$	Taille maximale de la fenêtre de contention de l' $AC_h$
$TL[h]$	Nombre maximum de paquets pouvant être transmis durant un TXOPlimit de l' $AC_h$
$NF[h]$	Nombre maximum de fragments pouvant être transmis durant un TXOPlimit de l' $AC_h$
$\sigma$	Durée d'un slot vide
$\partial$	Temps de propagation du signal
$P$	Taille de la charge utile d'un paquet de données
$F$	Taille de la charge utile d'un fragment de données
$MAC$	Taille de l'entête MAC
$PHY$	Taille de l'entête PHY
$T_F$	Durée de transmission de la charge utile d'un fragment.
$T_P$	Durée de transmission de la charge utile d'un paquet.
$T_{MAC}$	Durée de transmission de l'entête MAC
$T_{PHY}$	Durée de transmission de l'entête PHY
$AIFS[h]$	Durée de l'espacement arbitraire inter-paquet de l' $AC_h$

---

<i>SIFS</i>	Durée inter-paquet SIFS
<i>ACK</i>	Durée de transmission de l'aquittement ACK

---

TABLE 3.1 – Paramètres du modèle

### 3.2.4 Probabilités du modèle

Les probabilités indispensables à la réalisation de notre modèle sont :

1.  $\tau$  : Taux de transmission global ;
2.  $\tau[h]$  : Taux de transmission de données de la catégorie  $h$  ;
3.  $P[h]$  : Probabilité qu'un paquet de la catégorie  $h$  soit perdu à cause d'une collision ;
4.  $P_e$  : Probabilité qu'un paquet soit erroné ;
5.  $P_p$  : Probabilité d'atteindre la fin d'un paquet après avoir transmis tous ses fragments.

## 3.3 Description détaillée du modèle analytique EDCA

### 3.3.1 Proposition d'une chaîne de Markov pour 802.11e-EDCA

#### *Description de la chaîne de Markov :*

La chaîne de Markov de la Figure 3.1 modélise les états de Backoff d'une catégorie d'accès  $h \in (BK, BE, VI, VO)$  du protocole IEEE 802.11e-EDCA.

Dans cette chaîne nous définissons :  $b_{[h]}(t)$  et  $s_{[h]}(t)$  comme les processus stochastiques qui représentent respectivement à l'instant  $t$ , le compteur et l'étage du *Backoff* pour une station virtuelle  $h$  donné. Nous utilisons le couple  $(i, j)$  pour représenter les différentes valeurs du compteur Backoff dans les différents étages, avec  $i \in (0, m[h])$  et  $j = -TL[h], \dots, -1, 0, 1, \dots, W_i[h] - 1$ . Où  $W_i[h]$  représente la taille de la fenêtre de contention pour un étage  $i$  du processus Backoff, pour une catégorie  $h$ . Elle s'exprime comme suit :

$$W_i[h] = 2^i \cdot W_0[h] \quad (3.1)$$

Soit  $\{s_{[h]}(t), b_{[h]}(t)\}$  le processus stochastique bidimensionnel à temps-discret  $t$ , représentant chaque état de la chaîne de Markov pour la catégorie d'accès  $h$ . Pour tout  $i \in (0, m[h])$  ;

- Les états  $\{i, j\}, \forall j \in (0, W_i[h] - 1)$  : signifient que la station virtuelle  $h$  est dans l'état de décrémentation de son propre compteur du Backoff dans le  $i^{eme}$  étage.
- Les états  $\{i, j\}, \forall j \in (-TL[h], -1)$  : signifient que la station virtuelle  $h$  est dans l'état de transmission en burst (transmission du  $j^{eme}$  paquet parmi les  $TL[h]$  paquets de son propre TXOPlimit), pour la  $i^{eme}$  retransmission (étage).

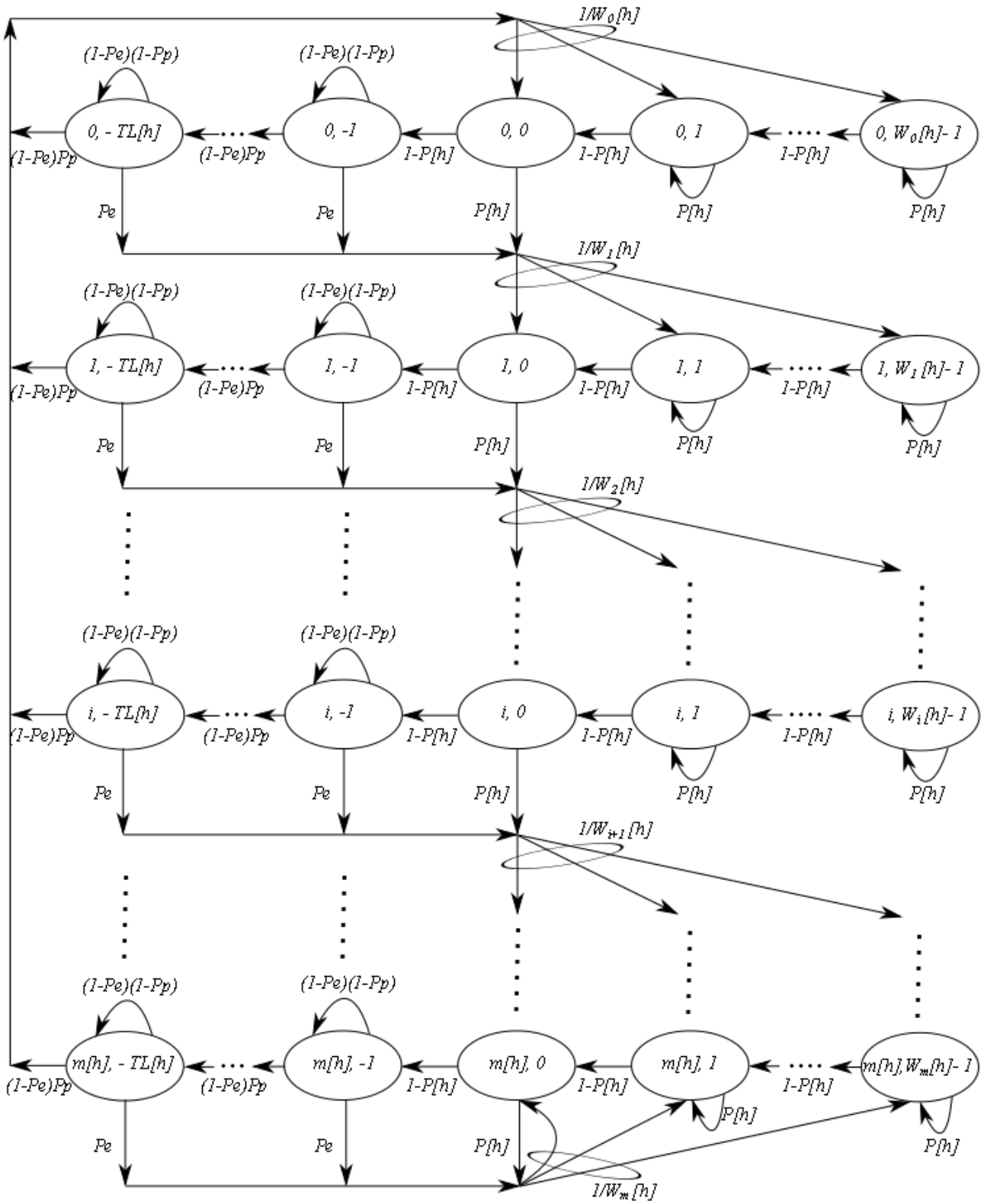


FIGURE 3.1 – Chaîne de Markov modélisant les états de Backoff et les états de transmission d'une catégorie d'accès  $h$  donnée

**Probabilités de transition :**

Nous présentons dans ce qui suit les probabilités de transition non nulles pour tout les états. On pose  $\mathbb{P}\{i_1, k_1/i_0, k_0\} = \mathbb{P}\{s_{[h]}(t+1) = i_1, b_{[h]}(t+1) = k_1/s_{[h]}(t) = i_0, b_{[h]}(t) = k_0\}$  : la probabilité que la station virtuelle  $h$  soit à l'état  $(i_1, k_1)$  à l'instant  $(t+1)$  sachant qu'elle était à l'état  $(i_0, k_0)$  à l'instant  $t$ .

$$\left\{ \begin{array}{ll} \mathbb{P}\{i, k/i, k+1\} = 1 - P[h] & i \in (0, m[h]), k \in (-1, W_i[h] - 2); \\ \mathbb{P}\{i, k/i, k\} = P[h] & i \in (0, m[h]), k \in (1, W_i[h] - 1); \\ \mathbb{P}\{i, k/i, k+1\} = (1 - P_e)P_p & i \in (0, m[h]), k \in (-TL[h], -2); \\ \mathbb{P}\{i, k/i, k\} = (1 - P_e)(1 - P_p) & i \in (0, m[h]), k \in (-TL[h], -1); \\ \mathbb{P}\{i, k/i - 1, 0\} = \frac{P[h]}{W_i[h]} & i \in (1, m[h]), k \in (0, W_i[h] - 1); \\ \mathbb{P}\{m[h], k/m[h], 0\} = \frac{P[h]}{W_m[h]} & k \in (0, W_m[h] - 1); \\ \mathbb{P}\{0, k/i, -TL[h]\} = \frac{(1-P_e)P_p}{W_0[h]} & i \in (0, m[h]), k \in (0, W_0[h] - 1); \\ \mathbb{P}\{i, k/i - 1, k'\} = \frac{P_e}{W_i[h]} & i \in (1, m[h]), k \in (0, W_i[h] - 1), k' \in (-TL[h], -1); \\ \mathbb{P}\{m[h], k/m[h], k'\} = \frac{P_e}{W_m[h]} & k \in (0, W_m[h] - 1), k' \in (-TL[h], -1). \end{array} \right. \quad (3.2)$$

**Calcul des probabilités d'états stationnaires :**

Nous remarquons que notre chaîne de Markov est ergodique. Donc pour calculer les probabilités d'états stationnaires, il suffit d'appliquer la propriété du régime permanent.

Soit  $\pi_{i,k}$  la probabilité stationnaire de l'état  $(i, k)$  pour une catégorie d'accès donnée. Pour résoudre le système et calculer les métriques de performances, il faut trouver les probabilités de tout les états de la chaîne de Markov. Pour obtenir la probabilité d'un état donné, il suffit de multiplier les probabilités de toutes les transitions qui aboutissent à cet état.

Nous supposons pour le moment que la valeur de  $\pi_{0,0}$  est connue, qui est la probabilité d'être au premier étage de backoff avec un compteur de Backoff nul. Nous essayons de calculer les probabilités de tout les états en fonction de cette probabilité, des probabilités de transition et des paramètres de différenciation EDCA. Après le calcul des probabilités de tout les états, nous avons obtenu les Équations (3.3).

$$\pi_{i,k} = \frac{W_i[h] - k}{W_i[h]} \cdot \frac{1}{1 - P[h]} \cdot \left\{ \begin{array}{ll} \alpha^i \cdot \pi_{0,0} & i \in (1, m[h] - 1), k \in (0, W_i[h] - 1); \\ \frac{\alpha^{m[h]}}{1 - \alpha} \cdot \pi_{0,0} & i = m[h], k \in (0, W_i[h] - 1). \end{array} \right. \quad (3.3)$$

$$\pi_{i,-k} = \frac{(1 - P[h]) \cdot ((1 - P_e)P_p)^{k-1}}{((1 - P_e)P_p + P_e)^k} \cdot \left\{ \begin{array}{ll} \alpha^i \cdot \pi_{0,0} & i \in (1, m[h] - 1), k \in (1, TL[h]); \\ \frac{\alpha^{m[h]}}{1 - \alpha} \cdot \pi_{0,0} & i = m[h], k \in (1, TL[h]). \end{array} \right.$$

Où,

$$\alpha = 1 - \frac{(1 - P[h]) \cdot [(1 - P_e)P_p]^{TL[h]}}{[(1 - P_e)P_p + P_e]^{TL[h]}}$$

**Calcul de l'expression de  $\pi_{0,0}$  :**

Ayant toutes les probabilités exprimées en fonction de  $\pi_{0,0}$ , il nous reste à calculer cette dernière. Pour ce faire, il faut appliquer la condition de normalisation, c.à.d. la somme de toutes les probabilités de la chaîne de Markov est égale à 1.

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^{m[h]} \sum_{k=0}^{W_i[h]-1} \pi_{i,k} + \sum_{i=0}^{m[h]} \sum_{k=1}^{TL[h]} \pi_{i,-k} &= 1 \\ \Rightarrow \pi_{0,0} \cdot \left[ \frac{(W_0[h] + 1) \cdot (1 - 2\alpha) + \alpha \cdot W_0[h] \cdot [1 - (2\alpha)^{m[h]}}{2 \cdot (1 - 2\alpha) \cdot (1 - \alpha) \cdot (1 - P[h])} + \frac{\alpha - P[h]}{P_e \cdot (1 - \alpha)} \right] &= 1 \\ \Rightarrow \pi_{0,0} = \frac{2 \cdot (1 - 2\alpha) \cdot (1 - \alpha) \cdot (1 - P[h])}{(1 - 2\alpha) \cdot \left[ (W_0[h] + 1) + \frac{2}{P_e} \cdot (\alpha - P[h]) \cdot (1 - P[h]) \right] + \alpha \cdot W_0[h] \cdot [1 - (2\alpha)^{m[h]}}] & \quad (3.4) \end{aligned}$$

**Taux de transmission  $\tau[h]$  des catégories d'accès :**

La probabilité  $\tau[h]$  qu'une station transmette un paquet de la priorité d'accès  $h$ , dans un slot de temps choisi aléatoirement, que ce soit une tentative de transmission réussie ou erronée, est donnée par la somme de tous les états  $\pi_{i,-k}$ ,  $i \in (0, m[h])$ ,  $k \in (-TL[h], -1)$ . Parce qu'une station peut transmettre si et seulement si elle est dans l'un de ces états.

$$\begin{aligned} \tau[h] &= \sum_{i=0}^{m[h]} \sum_{k=1}^{TL[h]} \pi_{i,-k} = \frac{\alpha - P[h]}{P_e \cdot (1 - \alpha)} \cdot \pi_{0,0} \\ \Rightarrow \tau[h] &= \frac{2 \cdot (1 - 2\alpha) \cdot (\alpha - P[h]) \cdot (1 - P[h])}{(1 - 2\alpha) \cdot [P_e (W_0[h] + 1) + 2(\alpha - P[h]) \cdot (1 - P[h])] + P_e \cdot \alpha \cdot W_0[h] \cdot [1 - (2\alpha)^{m[h]}}] \quad (3.5) \end{aligned}$$

**Taux de transmission global  $\tau$  :**

De point de vue station, la probabilité  $\tau$  qu'une station physique accède au canal et transmet ses données, est la probabilité qu'elle accède par l'intermédiaire de l'une de ses quatre ACs (BK, BE, VI, VO). Ce qui veut dire qu'au moins une de ses quatre ACs accède au canal. Ceci se traduit analytiquement par l'équation suivante :

$$\tau = 1 - \prod_{i=0}^3 (1 - \tau[i]) \quad (3.6)$$

Les valeurs de  $(i = \overline{0,3})$  signifient respectivement les quatre priorités d'accès (BK, BE, VI, VO), de la basse à la plus haute priorité.

**Probabilités de collision  $P[h]$  des catégories d'accès :**

La probabilité de collision virtuelle vue par une AC est la probabilité qu'au moins une des ACs de priorité supérieure essaie d'accéder au canal au même instant, donc :

$$P_{virtuelle}[h] = 1 - \prod_{i>h} (1 - \tau[i]) \quad (3.7)$$

L'expression  $(i > h)$  signifie que  $AC\_i$  est plus prioritaire que  $AC\_h$ .

La probabilité de collision réelle vue par une station est la probabilité qu'au moins une des autres  $(n-1)$  stations actives accède au canal au même instant.  $n$  étant le nombre total de stations physiques actives dans le réseau :

$$P_{reelle} = 1 - (1 - \tau)^{n-1} \quad (3.8)$$

D'où l'expression de la probabilité de collision vue par une AC :

$$P[h] = 1 - (1 - \tau)^{n-1} \cdot \prod_{i>h} (1 - \tau[i]) \quad (3.9)$$

**Probabilité  $P_p$  d'atteindre la fin d'un paquet :**

$$P_p = \frac{F}{P} \quad (3.10)$$

**Probabilité  $P_e$  d'une erreur de transmission d'un fragment :**

$$P_e = 1 - (1 - BER)^F \quad (3.11)$$

Finalement, nous obtenons un système d'équations non linéaires (3.12), à partir des formules (3.5), (3.6) et (3.9). Un système non linéaire à neuf inconnus ( $\tau, \tau[BK], \tau[BE], \tau[VI], \tau[VO], P[BK], P[BE], P[VI], P[VO]$ ) que nous pouvons résoudre avec une méthode numérique afin d'obtenir leurs valeurs numériques. Ces variables du système constituent les variables clés dans le calcul du débit de chaque catégorie d'accès comme nous le voyons dans la section suivante.

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau = 1 - [(1 - \tau[BK]) \cdot (1 - \tau[BE]) \cdot (1 - \tau[VI]) \cdot (1 - \tau[VO])] \\ P[BK] = 1 - [(1 - \tau)^{n-1} \cdot (1 - \tau[BE]) \cdot (1 - \tau[VI]) \cdot (1 - \tau[VO])] \\ P[BE] = 1 - [(1 - \tau)^{n-1} \cdot (1 - \tau[VI]) \cdot (1 - \tau[VO])] \\ P[VI] = 1 - [(1 - \tau)^{n-1} \cdot (1 - \tau[VO])] \\ P[VO] = 1 - (1 - \tau)^{n-1} \\ \tau[BK] = \frac{2 \cdot (1-2\alpha) \cdot (\alpha - P[BK]) \cdot (1 - P[BK])}{(1-2\alpha) \cdot [P_e(W_0[BK]+1) + 2(\alpha - P[BK]) \cdot (1 - P[BK])] + P_e \cdot \alpha \cdot W_0[BK] \cdot [1 - (2\alpha)^{m[BK]}]} \\ \tau[BE] = \frac{2 \cdot (1-2\alpha) \cdot (\alpha - P[BE]) \cdot (1 - P[BE])}{(1-2\alpha) \cdot [P_e(W_0[BE]+1) + 2(\alpha - P[BE]) \cdot (1 - P[BE])] + P_e \cdot \alpha \cdot W_0[BE] \cdot [1 - (2\alpha)^{m[BE]}]} \\ \tau[VI] = \frac{2 \cdot (1-2\alpha) \cdot (\alpha - P[VI]) \cdot (1 - P[VI])}{(1-2\alpha) \cdot [P_e(W_0[VI]+1) + 2(\alpha - P[VI]) \cdot (1 - P[VI])] + P_e \cdot \alpha \cdot W_0[VI] \cdot [1 - (2\alpha)^{m[VI]}]} \\ \tau[VO] = \frac{2 \cdot (1-2\alpha) \cdot (\alpha - P[VO]) \cdot (1 - P[VO])}{(1-2\alpha) \cdot [P_e(W_0[VO]+1) + 2(\alpha - P[VO]) \cdot (1 - P[VO])] + P_e \cdot \alpha \cdot W_0[VO] \cdot [1 - (2\alpha)^{m[VO]}]} \end{array} \right. \quad (3.12)$$

### 3.3.2 Calcul du débit de saturation

**Calcul du débit atteignable par les catégories d'accès :**

Soit  $S[h]$  le débit atteignable par une catégorie d'accès  $h$ , Il est défini par le rapport de la quantité de données utiles transmises par cette catégorie sur l'intervalle de temps entre deux transmissions successives (slot de temps complet). Autrement dit,  $S[h]$  peut être défini comme la fraction du temps où le canal est utilisé pour transmettre avec succès les charges utiles des fragments de la catégorie d'accès  $h$ .

$$S[h] = \frac{E[\text{Charges utiles de la catégorie } h \text{ transmises avec succès}]}{E[\text{Période du temps entre deux transmissions successives}]}$$

Pour calculer  $S[h]$ , nous examinons d'abord ce qui se passe dans un slot de temps choisi aléatoirement.

- Soit  $P_{tr}$  la probabilité d'avoir au moins une transmission (réussie ou échouée) dans un slot de temps donné, donc  $P_{tr}$  est égale à la probabilité que le canal soit occupé, voir l'expression (3.13) :

$$P_{tr} = 1 - (1 - \tau)^n \quad (3.13)$$

- La probabilité qu'il ait une transmission sans collision de la catégorie (que ce soit une transmission avec succès ou avec erreur), est donnée par la probabilité qu'une seule AC appartenant à une seule station transmet sur le canal. Elle est définie par l'équation suivante :

$$P_s[h] = n\tau[h](1 - \tau[h])^{n-1} \prod_{i=0, i \neq h}^3 (1 - \tau[i])^n \quad (3.14)$$

Dans notre modèle, contrairement aux autres modèles de la littérature, le paramètre TXOPlimit est pris en considération avec le mécanisme de fragmentation, donc une AC peut transmettre un burst de paquets de données à la fois, où chaque paquet de données est fragmenté en plusieurs fragments selon la probabilité  $P_p$ .

- Le nombre de paquets pouvant être transmises par une  $AC_h$  lors de son accès au canal est limité par son TXOPlimit[h]. Pendant cette période, l' $AC_h$  peut transmettre un nombre de paquets égal à TL[h] défini par l'équation (3.15).

$$TL[h] = \begin{cases} \left\lceil \frac{TXOPlimit[h]}{T_P} \right\rceil & \text{si TXOPlimit} \neq 0; \\ 1 & \text{si TXOPlimit} = 0. \end{cases} \quad (3.15)$$

$\left\lceil \cdot \right\rceil$  signifie la partie entière.

- Le nombre maximum de fragments NF[h] transmis par un TXOPlimit de la catégorie d'accès h :

$$NF[h] = \left\lceil \frac{P}{F} \right\rceil \cdot TL[h] \quad (3.16)$$

Où  $\left\lceil \frac{P}{F} \right\rceil$  est le nombre de fragments contenus dans chaque paquet.



Maintenant, nous exprimons les différentes durées des différents évènements du canal de transmission.

- Soit  $T_s[h]$  le temps pour la transmission avec succès de tout les fragments de la catégorie  $h$  (pas d'erreur de transmission).

$$T_s[h] = AIFS[h] + NF[h] \cdot [T_{MAC} + T_{PHY} + T_F + 2SIFS + 2\delta + ACK] - SIFS \quad (3.17)$$

- Le temps d'une transmission erronée  $T_e[h]$  (erreur de transmission sur le premier fragment) et le temps d'une collision de transmission  $T_c[h]$  pour la catégorie  $h$ , sont donnés par la même expression (3.18) :

$$T_e[h] = AIFS[h] + T_{MAC} + T_{PHY} + T_F + \delta = T_c[h] \quad (3.18)$$

- Soit  $T_j[h]$  le temps de transmission avec succès de  $j$  fragments de la catégorie  $h$ , avec le  $(j + 1)^{eme}$  fragment subira une erreur de transmission, où  $j = \overline{1, NF[h] - 1}$  :

$$T_j[h] = j \cdot [T_{MAC} + T_{PHY} + T_F + 2SIFS + 2\delta + ACK] - SIFS + T_e[h] \quad (3.19)$$

- Par la connaissance de la probabilité que le canal est occupé (Équation 3.13), nous pouvons définir la probabilité que le canal est libre par  $(1 - P_{tr})$ , ce qui fait la longueur moyenne d'un slot de temps vide  $\sigma$  est égale :  $(1 - P_{tr}) \cdot \sigma$ .

- En passant par les Équations (1.13) et (1.14), nous pouvons définir la probabilité qu'une transmission échoue à cause d'une collision pour la catégorie d'accès  $h$  par :  $P_{tr} \cdot (1 - P_s[h])$ . Dés lors, la durée moyenne d'une collision de la catégorie  $h$  est :  $P_{tr} \cdot (1 - P_s[h]) \cdot T_c[h]$ .

- Sachant que la probabilité d'une transmission erronée pour la catégorie  $h$  est :  $P_{tr} \cdot P_e \cdot P_s[h]$ , la durée moyenne d'une transmission échouée à cause d'une erreur pour la catégorie d'accès  $h$  est donnée comme suit :  $P_{tr} \cdot P_e \cdot P_s[h] \cdot T_e[h]$ .

- La probabilité d'une transmission avec succès de  $j$  fragments de la catégorie  $h$  est donnée par :  $P_{tr} \cdot P_e \cdot (1 - P_e)^j \cdot P_s[h]$ . En considérant cette probabilité, la durée moyenne d'une transmission réussie de  $j$  fragments de cette catégorie d'accès est définie par :  $P_{tr} \cdot P_e \cdot (1 - P_e)^j \cdot P_s[h] \cdot T_j[h]$ ,  $j = \overline{1, NF[h] - 1}$ .

- La probabilité d'une transmission avec succès de tout les fragments  $NF[h]$  (pas d'erreur de transmission) est :  $P_{tr} \cdot (1 - P_e)^{NF[h]} \cdot P_s[h]$ . Par conséquent, la durée moyenne d'une transmission avec succès de tout les fragments de la catégorie d'accès  $h$  est donnée par la formule suivante :  $P_{tr} \cdot (1 - P_e)^{NF[h]} \cdot P_s[h] \cdot T_s[h]$ .

Maintenant, il nous reste qu'à déterminer la quantité moyenne des données utiles transmises avec succès par chacune des quatre catégories d'accès pour exprimer l'expression du débit atteignable associé pour chaque catégorie.

- La quantité moyenne de données utiles transmises avec succès par une catégorie d'accès  $h$  est donnée comme suit :  $P_s[h] \cdot F \cdot \left[ P_e \sum_{j=1}^{NF[h]-1} j \cdot (1 - P_e)^j + NF[h] \cdot (1 - P_e)^{NF[h]} \right]$ .

Finalement, l'expression du débit atteignable par une catégorie d'accès  $h \in (BK, BE, VI, VO)$ , est définie par l'Équation (3.20).

$$S[h] = \frac{P_s[h] \cdot F \cdot \left[ P_e \sum_{j=1}^{NF[h]-1} j \cdot (1 - P_e)^j + NF[h] \cdot (1 - P_e)^{NF[h]} \right]}{(1 - P_{tr}) \cdot \sigma + P_{tr} \sum_{i=1}^3 \left[ \begin{array}{l} P_s[i] \cdot P_e \cdot T_e[i] + P_s[i] \cdot P_e \sum_{i=1}^{NF[i]-1} (1 - P_e)^j \cdot T_j[i] + \\ P_s[i] \cdot (1 - P_e)^{NF[i]} \cdot T_s[i] + (1 - P_s[i]) \cdot T_c[i] \end{array} \right]} \quad (3.20)$$

### Calcul du débit global :

De point de vu station physique, le débit global est défini par la somme des débits atteignables par toutes les catégories d'accès.

$$S = S[BK] + S[BE] + S[VI] + S[VO] \quad (3.21)$$

## 3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un nouveau modèle analytique par utilisation d'une chaîne de Markov pour EDCA, le mécanisme d'accès de base du 802.11e.

Notre modèle mathématique nous permet d'analyser la performance de ce protocole, par l'estimation du débit atteignable par chaque catégorie d'accès EDCA, dans toutes les configurations possibles (AIFS, CW et TXOPlimit) du protocole IEEE 802.11e-EDCA. Ceci dans un réseau fonctionnant en mode basique, sous la condition d'un trafic saturé et d'un environnement réel.

Le modèle que nous avons développé englobe toutes les caractéristiques de fonctionnement qu'offre EDCA pour la garantie de la QoS (différentiation par CW, AIFS, TXOPlimit et collision virtuelle). La principale contribution de ce modèle par rapport aux modèles existants dans la littérature est l'instauration du mécanisme de fragmentation qui est contrôlé par le biais de la probabilité  $P_p$ , et sa capacité d'évaluer ce mécanisme dans un milieu de transmission idéal ou bruité. Cette évaluation de performance est l'objet du prochain chapitre.

# 4

## Analyse des performances du IEEE 802.11e-EDCA

### 4.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons développé un modèle mathématique qui nous permettra de mener une analyse quantitative de la dégradation des performances du protocole de base 802.11e sous l'influence des paramètres du taux de perte par paquet. Par ailleurs, nous évaluerons l'impact du mode de transmission en burst (CFB) par le biais du paramètre TXOPlimit, et le niveau d'efficacité qu'offre le mécanisme de fragmentation de paquets.

Ce chapitre sera consacré, en premier lieu, à décrire le procédé d'analyse que nous avons suivi pour réaliser l'évaluation de performances du 802.11e. En deuxième lieu, nous présenterons nos résultats analytiques et une analyse de ces derniers mène à des conclusions qui n'existent pas dans la littérature.

## 4.2 Procédé d'analyse et paramètres utilisés

### 4.2.1 Méthode d'analyse et logiciels utilisés :

Obtenir une seule équation mathématique pour le calcul du débit est très désirable et c'est l'un des avantages de notre modèle analytique. Ceci veut dire que le calcul des métriques de performances peut se faire juste après la résolution du système non-linéaire.

Pour réaliser notre étude analytique, nous avons développé une application mathématique pour calculer et évaluer les performances du mécanisme d'accès EDCA du 802.11e à l'aide de deux logiciels mathématiques.

Nous avons utilisé le logiciel MathCad 14 pour résoudre notre système d'équations non linéaires à neuf inconnues (3.12) afin d'obtenir les valeurs numériques des différents taux de transmission des quatre catégories d'accès ( $\tau[BK]$ ,  $\tau[BE]$ ,  $\tau[VI]$ ,  $\tau[VO]$ ), et celles du taux de transmission global  $\tau$ . Par la suite, nous avons développé un programme mathématique sous Matlab pour implémenter notre expression du débit et calculer ses valeurs dans de différents scénarios expressifs, et générer les graphes adéquats.

### 4.2.2 Valeurs des paramètres utilisés :

Les valeurs des paramètres utilisés pour obtenir les résultats numériques de notre modèle analytique sont résumées dans les Tableau 4.1 et 4.2. Ces valeurs sont celles spécifiées pour la couche physique HR-DSSS telle qu'elle est décrite dans le standard [37] et les paramètres de différentiation par défaut d'EDCA 802.11e [02].

Paramètres	Valeur numérique
Temps de propagation du signal	1 $\mu s$
Durée d'un slot de temps vide	20 $\mu s$
SIFS	10 $\mu s$
Débit basique (débit de transmission de l'entête MAC et PHY et l'aquittement ACK)	2 Mbits/s
Débit de transmission des paquets de données	11 Mbits/s
Taille de l'entête PHY	192 bits
Taille de l'entête MAC	34 octets
Taille de l'ACK	14 octets
Taille maximale d'un paquet de données	2304 octets

TABLE 4.1 – Paramètres de la couche PHY HR-DSSS et de la couche MAC

AC	Maximum étage de Backoff (m)	AIFSN	$CW_{min}$	$CW_{max}$	TXOPlimit
<i>AC_BK</i>	5	7	32	1024	0
<i>AC_BE</i>	5	3	32	1024	0
<i>AC_VI</i>	1	2	16	32	6016 $\mu s$
<i>AC_VO</i>	1	2	8	16	3264 $\mu s$

TABLE 4.2 – Paramètres de différenciation par défaut d’EDCA

### 4.2.3 Principaux cas à analyser

Les principaux cas que nous discuterons par la suite se résument par les points suivants :

- Analyse de la dégradation de performances du mécanisme d’accès EDCA-802.11e dans un environnement radio exposé aux erreurs de transmission.
- Etude de l’impact de l’activation du mode CFB par biais du paramètre de différenciation TXOPlimit pour augmenter le débit de saturation du réseau 802.11e-EDCA.
- Analyse des déficiences de la transmission en burst dans un canal de transmission à forte perturbation.
- Evaluation du niveau de rendement du mécanisme de fragmentation pour palier à la dégradation du débit de la période CFB du 802.11e.

### 4.2.4 Etat du canal et variation du taux d’erreur

Notre modèle est conçu originellement pour analyser la performance du mécanisme d’accès EDCA du 802.11e, fonctionnant dans un environnement radio exposé aux phénomènes réels qui peuvent affecter l’état du canal de transmission, allant d’un canal idéal à un canal perturbé.

La perturbation du canal de transmission qui est estimée par la probabilité d’erreur par paquet ( $P_e$ ) peut être due soit par l’augmentation du taux d’erreur par bit (BER), ou soit par l’importante quantité de données à envoyer ( $P$ ), comme nous le saisissons analytiquement par l’équation suivante :

$$P_e = 1 - (1 - BER)^P \quad (4.1)$$

Le tableau ci-dessous présente la variation de la valeur de la probabilité d’erreurs par paquet en fonction du BER et de la taille des paquets de données  $P$ .

BER	$10^{-5}$	$3.10^{-5}$	$5.10^{-5}$	$7.10^{-5}$	$9.10^{-5}$	$10^{-4}$
P(octets)						
256	0.02	0.06	0.097	0.134	0.168	0.185
768	0.06	0.168	0.265	0.35	0.425	0.459
1024	0.079	0.218	0.336	0.436	0.522	0.559
1536	0.116	0.308	0.459	0.577	0.669	0.707
2304	0.168	0.425	0.602	0.725	0.81	0.842

TABLE 4.3 – Variation de la valeur  $P_e$  en fonction du BER et P

## 4.3 Analyse des résultats analytiques

### 4.3.1 Analyse de la dégradation des performances EDCA-sans CFB

Dans ce paragraphe, nous nous concentrons sur l'effet de la variation des paramètres du réseau (BER, taille du paquet, nombre de stations) sur l'évolution des performances du protocole 802.11e-EDCA. En effet, nous avons choisi d'évaluer le protocole sans considération du paramètre TXOPlimit (mode CFB désactivé), ce qui veut dire que le nombre de paquets à envoyer lorsqu'une station virtuelle gagne l'accès au canal est identique pour toutes les catégories d'accès et est égal à un (1 MPDU).

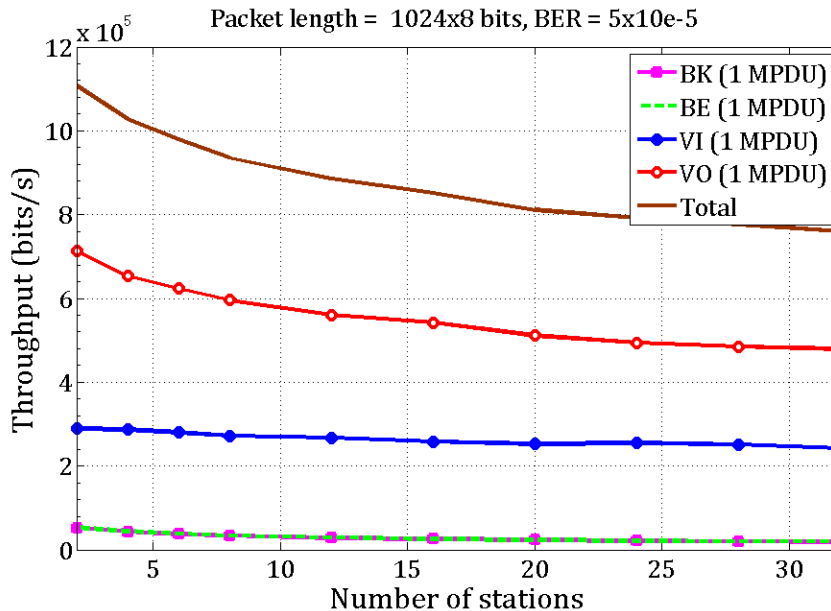


FIGURE 4.1 – Débits atteignables en fonction du nombre de stations (sans CFB)

La Figure 4.1 présente la variation du débit global et celui de chaque catégorie d'accès en

fonction du nombre de stations dans le réseau, fonctionnant dans un environnement moyennement perturbé.

Dans cette Figure, nous montrerons l'effet de l'augmentation du nombre de stations dans le réseau sur l'affaiblissement des performances du mécanisme EDCA 802.11e. La décroissance du débit global qui dépend des catégories d'accès est expliquée par le fait que plus il y a des stations dans le réseau, plus la concurrence pour le partage du canal est accrue et plus la probabilité de collision est élevée. La différence entre les performances des catégories d'accès en terme de l'utilisation de la bande passante est due des paramètres de différenciation de service activés (CW, AIFS, Collision virtuelle).

### *Influence du taux d'erreur par bit (BER) :*

Pour montrer l'effet du BER sur la métrique de performance, nous avons fixé la taille des paquets de données à 1024 octets et le nombre de stations dans le réseau à 16, et avons varié la valeur du BER de  $10^{-5}$ , qui représente un environnement faiblement perturbé, jusqu'à  $10^{-4}$  qui représente un canal de transmission fortement perturbé.

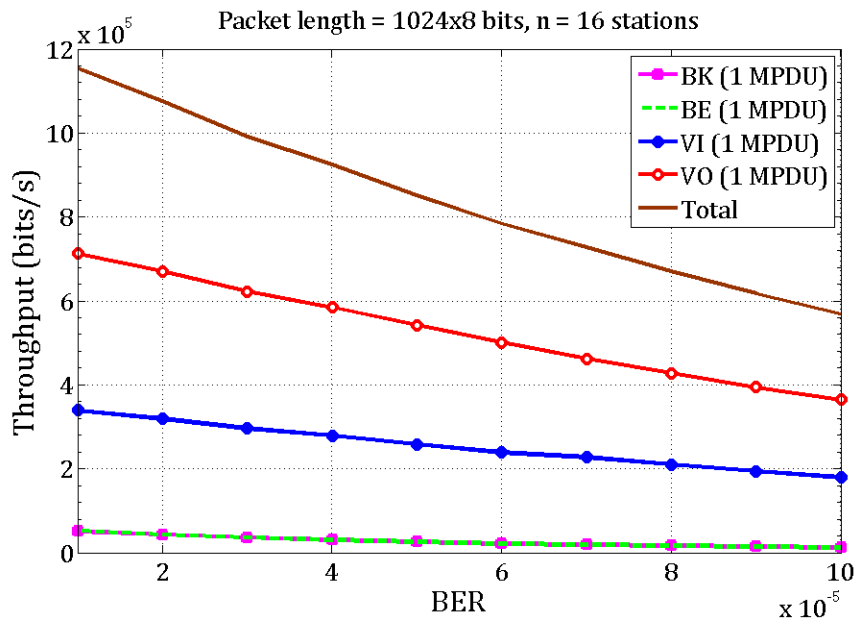


FIGURE 4.2 – Débits atteignables en fonction du taux d'erreur par bit (sans CFB)

Dés lors, la Figure 4.2 représente l'effet de perturbation du canal de transmission par biais du taux d'erreur par bit (BER) sur le débit atteignable par chaque catégorie d'accès ainsi que le débit global du réseau. Nous remarquons par les courbes affichées, une dégringolade notable du débit atteignable par les stations virtuelles ainsi que physiques, en simultanéité avec l'augmentation du taux d'erreur par bit (BER). Il est bien clair, que l'augmentation du BER



induit une probabilité d'erreur de transmission importante (Équation 4.1, Tableau 4.3), ce qui engendre des retransmissions qui influent considérablement sur la dégradation des performances du protocole 802.11e-EDCA.

### *Influence de la taille du paquet (P) :*

Cette fois ci, pour montrer l'effet de variation de la taille du paquet de 256 à 2048 octets sur le débit atteignable dans un réseau de 16 stations, nous avons fixé le taux d'erreur par bit BER à  $5 \cdot 10^{-5}$ . La Figure 4.3, représente à son rôle l'évolution de la quantité de données utiles transmises (bits) dans un slot de temps (secondes) par rapport à la taille des paquets de données à transmettre (bits), en spécifiant chaque catégorie d'accès avec sa courbe évocatrice.

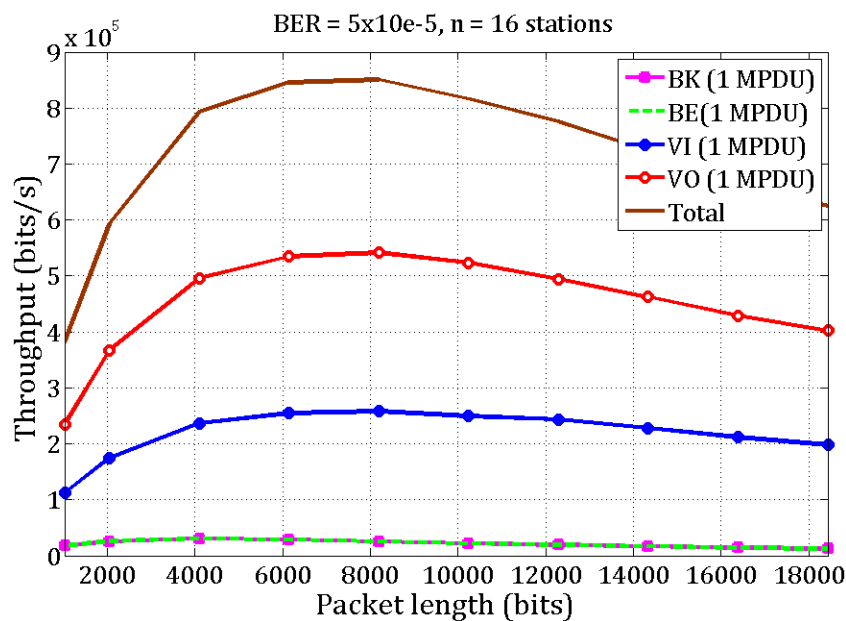


FIGURE 4.3 – Débits atteignables en fonction de la taille du paquet (sans CFB)

Nous constatons sur la Figure 4.3 deux périodes d'évolution du débit atteignable en fonction de la taille des paquets transmis. La période de non saturation du canal de transmission, dont toutes les courbes affichent une hausse progressive des données utiles transmises par unité du temps (Mbits/s), jusqu'à atteindre une valeur maximale propre à chaque catégorie d'accès. Par exemple, le total débit qui est la somme de toutes les catégories d'accès atteint une valeur maximale de 0.85 Mbits/s lorsque la taille des paquets vaut autour des 1024 octets. Quand la taille des paquets à transmettre dépasse cette valeur, le débit atteignable entre dans sa deuxième période de saturation du canal, où les courbes associées à toutes les catégories et celle du débit total se dégringolent en concordance avec l'augmentation de la taille des paquets.

Tenant compte du BER fixé à  $5 \cdot 10^{-5}$ , l'augmentation de la taille des paquets de 256 à 1024 octets signifie l'évolution de l'état du canal de transmission de faiblement à moyennement perturbé,

par conséquent, la remarquable progression des débits dans cette période est due aux faibles probabilités que des erreurs de transmission peuvent se produire dans un tel environnement, dès lors, le protocole EDCA se sert de l'importante taille des paquets pour les convertir en importantes données utiles transmises avec succès, donc, l'augmentation des performances du réseau. D'autre part, l'augmentation de la taille des paquets au-delà de 1024 octets signifie avoir un environnement à forte perturbation, ce qui engendre plus d'erreurs de transmission impliquant plus de retransmission, par conséquent, moins d'occupation du canal pour des transmissions utiles. Ce qui explique clairement la dégradation des performances dans cette période.

### 4.3.2 Analyse de l'impact du mode CFB (TXOPlimit) :

Nous commentons dans ce qui suit, quelques graphes que nous jugeons expressifs et suffisants pour l'évaluation de l'activation du paramètre TXOPlimit. Pour montrer l'effet de ce fameux paramètre sur les performances du réseau, nous exécutons avec le même scénario et même circonstance radio que celles de la Figure 4.1 mais cette fois-ci, en activant le mode CFB (Figure 4.4) pour pouvoir faire une comparaison entre les courbes résultantes.

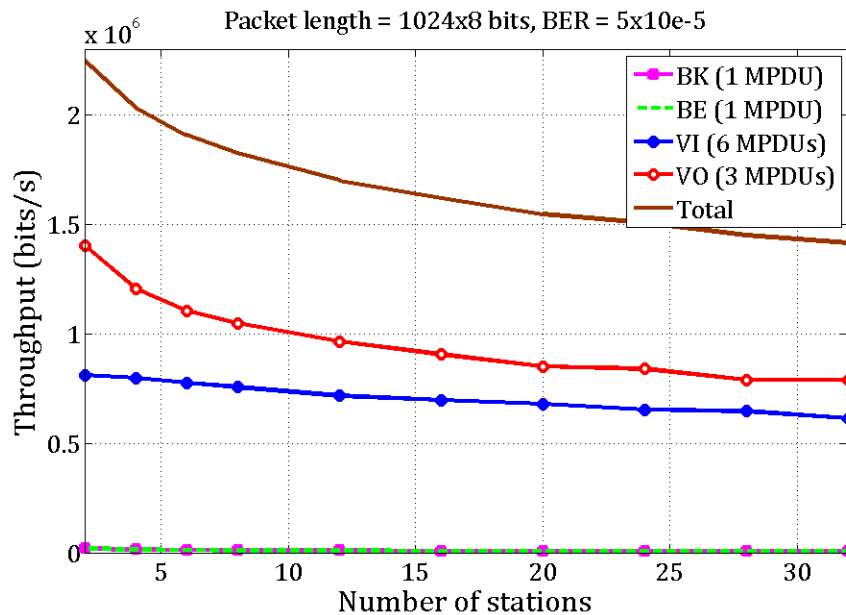


FIGURE 4.4 – Débits atteignables en fonction du nombre de stations (avec CFB)

Pour donner l'opportunité de la transmission en burst pour les catégories d'accès Video et Voice, nous avons considéré le paramètre de différenciation TXOPlimit comme suit : 6 paquets pour Video et 3 paquets pour Voice et 1 seul paquet pour Background et Best-Effort pour chaque limite de transmission.

En comparant le débit global des Figures 4.1 et 4.4, nous remarquons une augmentation considérable des données utiles transmises lorsque le mode CFB est activé, pour 5 stations dans le réseau son activation l'accroît de 1 Mbits/s à 2 Mbits/s. comme nous constatons que son activation instaure une stricte différenciation entre les catégories d'accès, en favorisant plus la Video et Voice et défavorisant Background et Best-Effort.

L'augmentation des performances globales du réseau par le biais d'activation du mode CFB est expliquée par le fait que les catégories Video et Voice ont plus de données à transmettre en les comparant aux deux autre catégories, par conséquent, donner plus d'opportunité à ces catégories en les favorisant par un nombre de paquet plus grand, signifie l'augmentation des données utiles transmises. Par conséquent, augmenter la performance du mécanisme EDCA dans un tel environnement.

### *Influence du taux d'erreur par bit (BER) :*

Pour évaluer l'efficacité du mode CFB dans un canal fortement perturbé, nous avons focalisé notre analyse sur les deux catégories d'accès concernées par la transmission en burst (Video, Voice). Comme nous avons fixé la taille des paquets à 1024 octets qui est la valeur moyenne, et le BER à  $10^{-5}$  pour avoir un canal faiblement perturbé et à  $10^{-4}$  pour provoquer un environnement fortement perurbé.

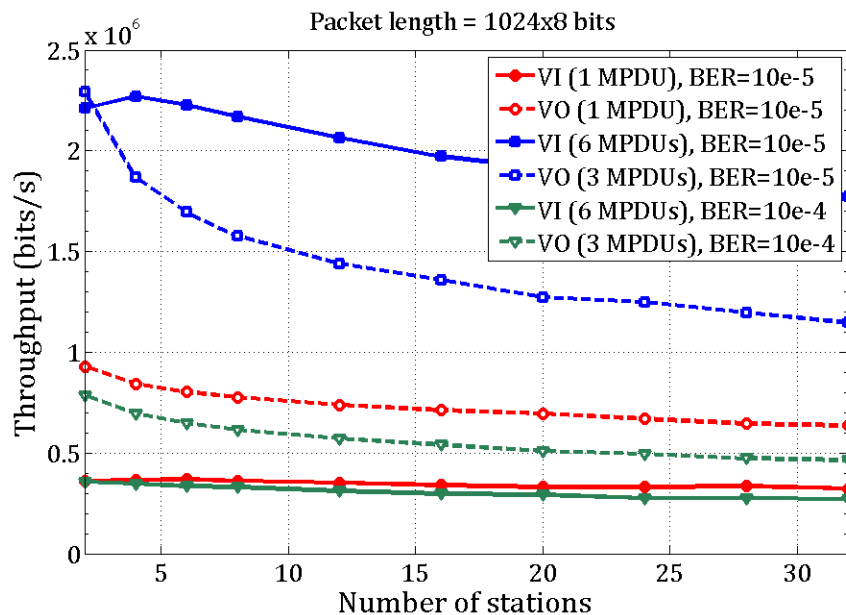


FIGURE 4.5 – Débits atteignables en fonction du nombre de stations (avec CFB)

La Figure 4.5 représente les variations du débit atteignable des catégories d'accès Video et Voice par rapport au nombre de stations dans le réseau, pour des configurations et contextes radio distincts. Le scénario étant comme suit, au début nous considérons le protocole EDCA

sans activation du mode CFB fonctionnant dans un environnement faiblement perturbé (courbes rouges), par la suite, nous activons le mode CFB et en gardant le même environnement radio (courbes bleues), finalement, nous gardons le mode CFB activé pour un canal de transmission à forte perturbation (courbes vertes).

Par ces pertinents résultats, nous remarquons que l'activation de la transmission en burst dans un canal à faible perturbation influe considérablement et positivement sur les performances du protocole et instaure une différenciation explicite entre les deux catégories en favorisant la Video. D'autre part, nous constatons que l'impact de son activation dans un milieu radio de forte perturbation est inopérant. La chute des courbes vertes le montre clairement.

L'accroissement de la quantité de données utiles transmises par l'activation du mode CFB dans un canal à faible perturbation est expliqué par le fait d'avoir de négligeables erreurs de transmission sur les paquets, le protocole bénéficie plus de bande passante, en donnant plus d'opportunité aux catégories qui ont plus de quantités de données à envoyer (Video, Voice) pour chaque accès au canal, contrairement lorsqu'il est désactivé, toutes les catégories transmettent un seul paquet par accès.

Par contre, lorsque les erreurs de transmissions par paquets sont plus importantes, l'utilisation de la période TXOPlimit n'est pas efficace. Ceci est dû aux délais supplémentaire (AIFS, CW, ACK, SIFS) qui s'ajoutent à la retransmission. Ce qui explique la déficience du mode CFB dans un canal à forte perturbation.

### 4.3.3 Analyse du mécanisme de fragmentation (PFM)

Dans cette section, notre objectif est de montrer l'efficacité du mécanisme de fragmentation pour réduire la dégradation des performances du protocole EDCA dans un environnement bruité. Pour ce faire, nous avons considéré ce protocole avec l'activation du mode CFB, pour un canal faiblement perturbé ( $BER=10^{-5}$ ) à fortement perturbé ( $BER=10^{-4}$ ). Comme nous avons considéré le mécanisme de fragmentation pour une taille de 512 octets par fragment, au moment où la taille du paquet est fixé à 1024 octets.

La Figure 4.6 représente la variation des débits atteignables par les catégories Video et Voice en fonction du nombre de stations, et configurations différentes. Les courbes rouges affichent les performances d'EDCA en activant le mode CFB dans un milieu à faible perturbation. Le changement de son état vers un milieu à forte perturbation est donné par les courbes bleues. L'ajout du mécanisme de fragmentation à ce dernier cas est donné par les courbes vertes.

Principalement dans cette Figure, nous comparons entre les courbes bleues et vertes pour se focaliser sur notre objectif. À cet effet, nous constatons que l'application de la fragmentation dans EDCA augmente considérablement les performances estimées en débits, notamment pour un canal de forte perturbation.

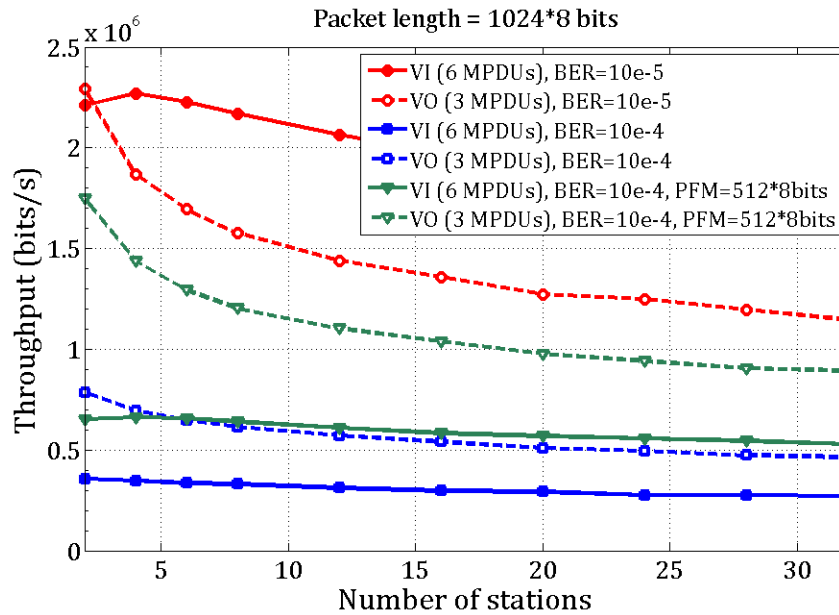


FIGURE 4.6 – Débits atteignables en fonction du nombre de stations (CFB et PFM)

Cette efficacité du PFM pour pallier à la dégradation des performances du protocole dans de tels circonstances radio est due au fait qu'il réduit proprement l'effet des erreurs de transmission, cela en envoyant chaque paquet en fragments de petites tailles, par conséquent, une erreur de transmission sur un fragment signifie une retransmission avec reprise par le dernier fragment erroné, ce qui accroît la quantité de données utiles envoyer avec succès. Or, dans le cas d'omission du PFM, l'erreur sur un paquet signifie la retransmission de la totalité du paquet.

## 4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mis l'accent sur l'analyse des performances du protocole 802.11e-EDCA, où nous avons traité l'effet des erreurs de transmission sur la dégradation des performances du réseau. Nous nous sommes intéressés à évaluer le mode CFB et le mécanisme PFM pour augmenter les performances du 802.11e-EDCA dans des situations distinctes et configurations expressives.

Cependant, l'analyse des résultats a montré nettement l'effet de l'environnement radio sur la détérioration des performances du protocole EDCA, une détérioration entraînée et contrôlée par le taux d'erreur par bit et la taille des paquets envoyés. Comme elle a confirmé l'impact de l'activation du mode CFB sur l'augmentation des performances du réseau, pour un canal de faibles à moyennes perturbations, et sa déficience lorsque le canal est fortement perturbé. Dès lors, ce qui remet en cause tout les modèles analytiques qui assument un canal de transmission parfait, et tout ceux qui négligent la modélisation et la prise en considération du paramètre

d'EDCA, TXOPlimit. À son tour, le mécanisme de fragmentation que nous avons proposé a montré un niveau d'efficacité notable pour réduire l'effet de l'environnement radio sur les performances du 802.11e-EDCA.

# Conclusion générale

Nous constatons aujourd'hui une forte demande des services multimédia et temps réel dans les réseaux sans fil basés sur la technologie IEEE 802.11. Or, plusieurs caractéristiques de ces réseaux font que le déploiement à grande échelle de tels services présente un réel challenge par rapport aux applications telles que la messagerie électronique et le transfert de fichier. Les normes des réseaux sans fil IEEE 802.11 doivent alors satisfaire les exigences des applications audiovisuelles qui sont la bande passante, un délai de transfert borné et un taux de perte de paquets acceptable.

Dans le cadre de ce projet, nous nous sommes intéressés à la modélisation analytique d'EDCA, le mécanisme d'accès de base de la norme IEEE 802.11e, et à l'analyse de la dégradation de ses performances, estimées en débits pour chaque catégorie d'accès, sous l'influence des paramètres du taux d'erreurs par paquet, taux d'erreur par bit et la taille des paquets de données. D'une part, nous avons affirmé l'impact de l'activation du mode CFB pour augmenter les débits des stations virtuelles Audio/Vidéo, dans un canal de transmission non bruité. D'autre part, nous avons montré sa défaillance dans un canal bruité. Afin d'améliorer les performances du protocole IEEE 802.11e-EDCA dans un environnement radio, nous avons proposé le mécanisme de fragmentation. L'évaluation de ce mécanisme a montré son efficacité pour réduire la dégradation des performances de la norme 802.11e-EDCA avec TXOPlimit.

Pour atteindre notre objectif, nous avons proposé un modèle analytique simple et complet reproduisant le plus fidèlement possible le comportement d'un réseau 802.11e-EDCA avec TXOPlimit et intégrant le mécanisme de fragmentation, dans les conditions d'un canal non idéal. Le modèle mathématique que nous avons proposé, basé sur le formalisme de chaînes de Markov, nous a permis d'estimer les probabilités stationnaires pour que des catégories d'accès transmettent leurs trafics dans un slot de temps donné. Ces probabilités nous permettent ainsi de développer des modèles mathématiques pour le calcul du débit atteignable pour chaque catégorie d'accès et aussi le débit global du réseau.

La mise en œuvre de notre modèle sous les deux logiciels Mathcad et Matlab nous a permis d'analyser le comportement du protocole IEEE 802.11e-EDCA dans des situations distinctes pour prescrire des scénarios typiques et générer des graphes adéquats.

Nos résultats analytiques montrent une dégradation significative des performances du protocole IEEE 802.11e-EDCA (une diminution accrue de l'utilisation de la bande passante) lorsque le taux d'erreurs par bit et/ou la taille des paquets de données augmentent. En particulier, le paramètre TXOPlimit qui a été conçu originellement pour augmenter le débit des stations virtuelles, en procurant plus de priorité aux applications multimédia (Audio/Vidéo), a été démontré dans notre travail inefficace lorsque des erreurs de transmission sont importantes. Par ailleurs, nos résultats ont montré que, à l'égard de ces dégradations de performances et lorsque le TXOPlimit n'a pas pu garantir de la QoS aux applications multimédia, l'application du mécanisme de fragmentation de paquets permet de prolonger les périodes CFBs pour la transmission en burst des catégories d'accès les plus exigeantes en termes de la QoS (Audio/Vidéo).

Le travail réalisé durant ce projet et les résultats obtenus ouvrent des perspectives, résumées comme suit :

- Extension de notre modèle pour prendre en compte le mode de transmission RTS/CTS avec TXOPlimit.
- Évaluer le mécanisme de fragmentation lorsque 802.11e-EDCA utilise le mode RTS/CTS et montrer s'il reste toujours résistant aux erreurs de transmission en considérant TXOPlimit et RTS/CTS.
- Modéliser analytiquement le mécanisme d'accès HCCA et analyser ses performances dans un environnement radio.



# Bibliographie

- [01] A. Ksentini : *Qualité de Service (QoS) dans les réseaux locaux sans fil basés sur la technologie IEEE 802.11*, Thèse de Doctorat, Université Cergy-Pontoise, Décembre 2005.
- [02] IEEE Standard : *Part 11 : Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications Amendment 8 : Medium Access Control (MAC) Quality of Service Enhancements*, IEEE Std 802.11e-2005 (Amendment to IEEE Std 802.11, 1999 Edition (Reaff 2003)), PP.0-189, 2005.
- [03] K. Ban and H. Gharavi : *IEEE 802.11 FHSS receiver design for cluster-based multihop video communications*, Journal of Wireless Communications and Mobile Computing, 2(6) : PP.595-605, Septembre 2002.
- [04] M. Lacage, M.H. Manshaei and T. Turletti : *IEEE 802.11 rate adaptation : a practical approach*, Proceedings of the 7th ACM International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems, PP.126-134, 2004.
- [05] J. Terry and J. Heiskala : *OFDM wireless LANs : a theoretical and practical guide*, Sams Publishing, Janvier 2002.
- [06] J. Jun, P. Pushkin and M. Sichitiu : *Theoretical Maximum Throughput of IEEE 802.11 and its Applications*, Conference Publications, Proceedings of the IEEE International Symposium on Network Computing and Applications, PP.249-257, 2003.
- [07] N. Chendeb-Taher : *Modélisation Analytique et Contrôle d'Admission dans les Réseaux 802.11e pour une Maîtrise de la Qualité de Service*, Thèse de Doctorat, Université Evry-Val d'Essonne, Mars 2009.
- [08] K. Dridi : *Spécification du Protocole MAC pour les Réseaux IEEE 802.11e à Différentiation de Services sous Contrainte de Mobilité*, Thèse de Doctorat, Université Paris-Est, Décembre 2011.
- [09] Y. Yan and C. Pan : *An Improved Analytical Model for IEEE 802.11e Enhanced Distributed Channel Access*, In Information Technology Convergence-ISITC, PP.135-142, Jeonju, Novembre 2007.

- 
- [10] J.W.T. Robinson : *An analytical Model for the Service Delay Distribution of IEEE 802.11e Enhanced Distributed Coordination Function*, Mémoire de Master, Université Simon Fraser. 2005.
- [11] T. Tsai and M. Wu : *An Analytical Model for IEEE 802.11e EDCA*, In ICC-IEEE International Conference Communications, PP.3474-3478, Seoul, Mai 2005.
- [12] Y. Xiao : *Performance Analysis of IEEE 802.11e EDCF under Saturation Condition*, In ICC-IEEE International Conference Communications, PP.170-174, Paris, 2004.
- [13] J. Hui and M. Devetsikiotis : *Performance Analysis of IEEE 802.11e EDCA by a Unified Model*, In GLOBECOM-IEEE Global Telecommunications Conference, PP.754-759, Dallas-Texas, Décembre 2004.
- [14] Z. Tao and S. Panwar : *An Analytical Model for the IEEE 802.11e Enhanced Distributed Coordination Function*, In ICC-IEEE International Conference Communications, PP.4111-4117, Paris, Juin 2004.
- [15] Y. Chen, Q. Zeng and D.P. Agrawal : *Performance Analysis of IEEE 802.11e Enhanced Distributed Coordination Function*, In ICON, 2003.
- [16] K. Xu, Q. Wang and H. Hassanein : *Performance Analysis of Differentiated QoS Supported by IEEE 802.11e Enhanced Distributed Coordination Function (EDCF) in WLAN*, In GLOBECOM-IEEE Global Telecommunications Conference, PP.1048-1053, San Francisco, Décembre 2003.
- [17] J. Hui and M. Devetsikiotis : *Designing Improved MAC Packet Schedulers for 802.11e WLAN*, In GLOBECOM-IEEE Global Telecommunications Conference, PP.184-189, San Francisco, Décembre 2003.
- [18] H. Zhu and I. Chlamtac : *An Analytical Model for IEEE 802.11e EDCF Differential Services*, In ICCCN-The 12th International Conference Computer Communications and Networks, PP.163-168, Dallas, Octobre 2003.
- [19] L. Xiong and G. Mao : *Saturated Throughput Analysis of IEEE 802.11e EDCA*, In Computer Networks, 51(11) : PP.3047-3068, Aout 2007.
- [20] Z. Kong, D.H.K. Tsang, B. Bensaou and D. Gao : *Performance Analysis of IEEE 802.11e Contention-Based Channel Access*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 22(10) : PP.2095-2106, Décembre 2004.
- [21] Z. Tao and S. Panwar : *Throughput and Delay Analysis for the IEEE 802.11e Enhanced Distributed Channel Access*, IEEE Transactions on Communications, 54(4) : PP.596-603, Avril 2006.
- [22] H. Wu, X. Wang, Q. Zhang and X. Shen : *IEEE 802.11e Enhanced Distributed Channel Access (EDCA) Throughput Analysis*, In ICC-IEEE International Conference Communications, PP.223-228, Istanbul, Juin 2006.
-

- 
- [23] J.W. Robinson and T.S. Randhawa : *Saturation Throughput Analysis of IEEE 802.11e Enhanced Distributed Coordination Function*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 22(5) : PP.917-928, Juin 2004.
- [24] Y. Lin and V.W.S. Wong : *Saturation throughput of IEEE 802.11e EDCA based on mean value analysis*, In WCNC-IEEE Wireless Communications and Networking Conference, PP.475-480, Las Vegas, Avril 2006.
- [25] J. Hui and M. Devetsikiotis : *A Unified Model for the Performance Analysis of IEEE 802.11e EDCA*, IEEE Transactions on Communications, 53(9) : PP.1498-1510, Septembre 2005.
- [26] J.W. Tantra, C.H. Foh and A.B. Mnaouer : *Throughput and Delay Analysis of the IEEE 802.11e EDCA Saturation*, In ICC-IEEE International Conference Communications, PP.3450-3454, Seoul, Mai 2005.
- [27] X. Ling : *Performance Analysis of Distributed MAC Protocols for Wireless Networks*, Thèse de Doctorat, Université de Waterloo, Canada, 2007.
- [28] G. Bianchi : *Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 18(3), Mars 2000.
- [29] H. Wu, Y. Peng, K. Long, S. Cheng and J. Ma : *Performance of Reliable Transport Protocol over IEEE 802.11 Wireless LAN : Analysis and Enhancement*, In INFOCOM-Proceedings Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, PP.599-607, New York, 2002.
- [30] E. Ziouva and T. Antonakopoulos : *CSMA/CA Performance Under High Traffic Conditions : throughput and Delay Analysis*, In Computer Communications, 25(3) : PP.313–321, Février 2002.
- [31] Y.C. Yao, J.H. Wen and C.E. Weng : *The Performance Evaluation of IEEE 802.11e for Qos Support in Wireless LANs*, Springer Science-Business-Media-LLC, 69(1) : PP.413-425, Avril 2012.
- [32] S. Choi : *Multiple Frame Exchanges During EDCF TXOP*, IEEE 802.11, Janvier 2002.
- [33] J. del Prado and S. Choi : *EDCF TXOP Bursting Simulation Results*, IEEE 802.11e Working Document, Janvier 2002.
- [34] S. Choi, J. del Prado, S. Shankar and S. Mangold : *IEEE 802.11 e Contention-Based Channel Access (EDCF) Performance Evaluation*, In ICC-IEEE International Conference Communications, PP.1151-1156, Alasca, Mai 2003.
- [35] S. Mangold, S. Choi, P. May, Hiertz and Guido : *IEEE 802.11e-Fair Resource Sharing Between Overlapping Basic Service Sets*, The 13th IEEE International Symposium Personal Indoor and Mobile Radio Communications, PP.166-171, Lisboa, Septembre 2002.
-

- [36] M. YAZID and L. Ziane-Khodja : *Analyse des Performances du Standard IEEE 802.11 Mode Ad-Hoc dans un Environnement Radio : de la Modélisation Analytique à la Simulation*, Mémoire d'Ingénieur, Université Abderrahmane-MIRA de Béjaïa, 2008.
- [37] *Wireless LAN MAC and PHY Specifications : Higher Speed Physical Layer (PHY) Extension in the 2.4 GHz Band*, IEEE 802.11b Supplement to 802.11, 1999.
- [38] G. Deyun, C. Jianfei and N.N. King : *Admission Control in IEEE 802.11e Wireless LANs*, Journals and Magazines, IEEE Network, 19(4) : PP.6-13, Juillet 2005.