

Université Abou Bekr Belkaid  
Tlemcen Algérie



جامعة أبي بكر بلقايد

تلمسان الجزائر

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



# THESE

Présentée

A L'UNIVERSITE DE TLEMCEM  
FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE ET ELECTRONIQUE

Pour l'obtention du diplôme de

## DOCTORAT

Spécialité : " Systèmes et Réseaux de Télécommunications "

Par

*BEMMOUSSAT Chems eddine*

---

*CONTRIBUTION A L'ETUDE DU TRAFIC MULTIMEDIA  
SUR WIFI MESH (IEEE 802.11s)*

---

**Soutenu en Octobre 2013 devant le Jury:**

CHIKH Mohamed Amine.	Pr, Université de Tlemcen	Président
SENOUCI Sidi Mohammed	Pr, Université de Bourgogne, France	Examineur
BENYETTOU Abdelkader	Pr, Université UST-Oran	Examineur
BENYETTOU Mohammed	Pr, Université UST-Oran	Examineur
FEHAM Mohammed	Pr, Université de Tlemcen	Directeur de Thèse
DIDI Fedoua	MCA, Université de Tlemcen	Co-directeur de Thèse

# Remerciements

Si cette thèse a pu voir le jour, c'est certainement grâce à ALLAH et au soutien et à l'aide de plusieurs personnes. Je profite de cet espace pour les remercier tous.

Au terme de ce travail de longue haleine, je tiens à remercier tous celles et ceux qui m'ont aidée de près ou de loin à mener à bien ma recherche, tous ceux ou celles qui étaient disponibles et ont participé à rendre plus humaine, plus riche et enrichissante cette longue expérience. Mes remerciements iront aussi bien à mes enseignants qu'au cadre administratif de notre département, mais aussi à ma famille, et à mes ami(e)s.

Je remercie tout d'abord mon directeur de thèse Professeur FEHAM Mohammed, qui, tout au long de quatre ans, m'a appuyée et m'a encouragée à donner le meilleur de moi-même. Je lui exprime toute ma gratitude pour avoir réussi à stimuler continuellement mes capacités et mon potentiel. Il a su être réconfortant et généreux sans jamais laisser de côté la rigueur ni la précision qui incombent à la recherche.

Je tiens également à remercier Mme DIDI Fedoua pour son encadrement, ses conseils laborieux et son soutien qui m'ont permis de mener à bien ce projet de thèse, elle a été toujours une source inépuisable d'idées, de savoir et d'encouragement.

Mes vifs remerciements sont aussi adressés à tous les membres du jury :

CHIKH Mohamed Amine, professeur à l'université de Tlemcen, SENOUCI Sidi Mohammed, Professeur à l'université de Bourgogne-France, BENYETTOU Abdelkader et BENYETTOU Mohammed, Professeurs à l'université UST-Oran, pour m'avoir fait l'honneur d'accepter d'évaluer mon projet de thèse.

Je remercie également tous mes collègues de laboratoire STIC pour leur collaboration active et leur présence.

Enfin, je n'oublierais pas d'exprimer toute ma reconnaissance à certains membres de ma famille (ma chère et adorable mère, mon exceptionnel père, ma sœur Farah et mon frère Hichem) et à mes ami(e)s proches, qui m'ont soutenus, ne serait-ce que par le cœur, et qui ont su être présent(e)s quand j'ai eu besoin d'eux.

# Dédicaces

À la personne que rien ne pourra récompenser,  
à l'actrice principal derrière la réussite de ce travail,  
à la personne qui a tant sacrifiée et qui était à tout moment à côté de moi,  
à ma chère maman.

À la source d'ambition, d'espoir, de bonheur et de joie,  
à mon père, à mon frère Hichem et à ma sœur Farah,  
que Dieu me permette de vous voir un jour aux positions les plus élevées...

À mes deux grandes mères et à tous les membres de ma famille, surtout à ma cousine Nawel,  
mes pensées les meilleures t'accompagnent,  
puissent-elles t'apporter le réconfort et l'encouragement à ton prompt rétablissement.

À mes ami(e)s les plus proche : Manel, Imane, Mourad, Mohammed, Omar.

## Résumé

L'un des défis majeurs dans la convergence des réseaux et des services vers la technologie tout-IP est le maintien de la qualité de service (QoS) des flux audio/vidéo transmis sur ce type de réseaux. Ce problème est accentué quand ce type de flux traverse des liens sans fil comme les réseaux maillés sans fil (WMN: Wireless Mesh Network), qui ont suscités un grand intérêt auprès de la communauté des chercheurs. Dans ce cas, les services doivent faire face à plusieurs inconvénients engendrés par le manque de fiabilité du canal sans fil et son partage par plusieurs utilisateurs.

Si l'utilisation de voix et vidéo sur IP fonctionne correctement sur un réseau WiFi avec un seul point d'accès, les performances en termes de qualité de service sont altérées sur un réseau WiFi maillé où chaque point d'accès sert de relais aux suivants. En effet, le partage d'un même canal radio sur de grandes surfaces par plusieurs nœuds, qui ne se captent pas toujours, permet d'établir difficilement des communications nécessitant la QoS.

L'objectif de ce travail de Thèse de Doctorat est de solutionner certaines limitations rencontrées à l'heure actuelle dans les réseaux maillés sans fil et d'améliorer la QoS des applications multimédias temps réel. Le travail mené a été divisé essentiellement en deux principaux volets: proposition d'un algorithme de routage Q-CBRP étendu aux réseaux maillés, et la différenciation du trafic avec la proposition d'un paramétrage de contention.

**Mots clés :** Réseaux maillés sans fil, Protocoles de routage, différenciation de services, qualité de service (QoS), flux multimédia.

## **Abstract**

One of the major challenges in the convergence of networks and services to all-IP technology is maintaining the quality of service (QoS) of audio / video streams transmitted over such networks. This problem is accentuated when this type of flow through wireless links such as wireless mesh network (WMN: Wireless Mesh Network), which aroused great interest among the research community. In this case, the services face several disadvantages caused by the unreliability of the wireless channel and shared by several users.

If the use of voice and video over IP works properly on a wireless network with a single access point, the performance in terms of quality of service are altered on a wireless mesh network where each access point acts as a relay to the following. Indeed, sharing the same radio channel over large areas by several nodes, which do not always pick up, allows for difficult communications requiring QoS.

The aim of this PhD work is to solve some of the limitations encountered at present in wireless mesh networks and improve the QoS of real-time multimedia applications. The work carried out was basically divided into two main components: a proposed routing algorithm Q-CBRP extended to mesh networks and differentiation of traffic with a proposal setting contention.

**Keywords:** Wireless mesh networks, routing protocols, quality of service (QoS), multimedia applications.

## ملخص

واحدة من التحديات الرئيسية في تقارب الشبكات والخدمات للتكنولوجيا يتم الحفاظ على جودة الخدمة من تيارات الصوت / الفيديو المنقولة عبر هذه الشبكات. وتتأكد هذه المشكلة عند هذا النوع من التدفق من خلال وصلات لاسلكية مثل شبكة لاسلكية، الذي أثار اهتماما كبيرا بين الأوساط البحثية. في هذه الحالة، يواجه العديد من الخدمات مساوئ الناجمة عن عدم إمكانية الاعتماد على قناة لاسلكية والمشاركة من قبل العديد من المستخدمين.

إذا كان استخدام الصوت والفيديو عبر بروتوكول الإنترنت يعمل بشكل صحيح على شبكة لاسلكية مع نقطة وصول واحدة، يتم تغيير أداء من حيث نوعية الخدمة على شبكة لاسلكية شبكة حيث تعمل كل نقطة وصول وحدة التتابع لما يلي في الواقع، وتقاسم قناة الراديو نفسه على مساحات واسعة من قبل العديد من العقد، الذي لا اختيار دائما، ويسمح للاتصالات صعبة تتطلب جودة الخدمة.

والهدف من هذا العمل أطروحة دكتوراه هو حل بعض القيود واجه في الوقت الحاضر في الشبكات اللاسلكية شبكة وتحسين جودة الخدمة من تطبيقات الوسائط المتعددة في الوقت الحقيقي. العمل الذي اضطلع تم تقسيم أساسا إلى عنصرين رئيسيين هما: خوارزمية التوجيه المقترحة توسيع التشبيك والتفريق بين حركة المرور مع وضع اقتراح خلاف.

**كلمات البحث:** شبكات شبكة لاسلكية، بروتوكولات التوجيه، والتمايز الخدمة، جودة الخدمة تيارات متعددة الوسائط

# Table des matières

<b>Remerciements</b> .....	1
<b>Dédicace</b> .....	2
<b>Résumé</b> .....	3
<b>Table des matières</b> .....	6
<b>Liste des tableaux</b> .....	9
<b>Liste des figures</b> .....	10

## Introduction Générale

i.	Contexte de recherche.....	11
ii.	Motivations et objectifs.....	12
iii.	Contributions et organisation de la thèse.....	13

## Chapitre I : Introduction au standard 802.11s (Wifi Maillé)

1.1.	Introduction.....	15
1.2.	Le standard IEEE802.11s.....	16
1.3.	Architecture des réseaux maillés.....	17
1.3.1.	Infrastructure/Backbone WMNs.....	18
1.3.2.	Clients maillés.....	19
1.3.3.	Réseaux maillés Hybride.....	19
1.4.	Caractéristiques .....	20
1.5.	Fonctionnement du Wifi maillé IEEE 802.11s.....	21
1.5.1.	Couche physique .....	22
1.5.2.	Couche liaison.....	22
1.5.3.	Couche réseau.....	26
1.6.	Les Applications des réseaux maillés.....	27
1.7.	Qualité de service dans les réseaux maillés sans fil.....	30
1.8.	Conclusion.....	32

## Chapitre II : Etat de l'art des solutions apportées par les réseaux maillés

2.1.	Introduction.....	33
2.2.	Solutions orientées couche réseau.....	34
2.2.1.	Comparaison et améliorations des protocoles de base existants.....	34
2.2.2.	Routage se basant sur un nombre de sauts minimal.....	35
2.2.3.	Routage se basant sur des estimations de la liaison et la bande passante.....	36
2.2.4.	Routage en sens inverse de la topologie.....	36
2.2.5.	Routage basé sur la garantie de la bande passante.....	36
2.2.6.	Routage évitant les nœuds égoïstes.....	37
2.2.7.	Routage aléatoire.....	37
2.2.8.	Routage multicast pour des applications multimédia.....	38
2.2.9.	Routage basé sur les clusters.....	38
2.2.10.	Synthèse.....	40

2.3.	Solutions orientées couche Liaison de données.....	40
2.3.1.	Améliorations du CSMA/CA pour un gain en QoS.....	40
2.3.2.	Utilisation du TDMA à la place de CSMA/CA.....	41
2.3.3.	Agrégation en temps réel pour des applications multimédia.....	41
2.3.4.	Gestion de flux multimédia sur une plateforme dédiée au 802.11s.....	41
2.3.5.	Contrôle d'erreur du canal pour une application streaming sur le WMNs.....	42
2.3.6.	Amélioration du TDMA pour un gain de la QoS.....	42
2.3.7.	Estimation de la bande passante et la qualité du canal.....	43
2.3.8.	Optimisation.....	43
2.3.9.	Synthèse.....	45
2.4.	Solutions orientées couche physique.....	46
2.4.1.	Codage de l'information et du canal et utilisation d'une architecture adéquate.....	46
2.4.2.	Utilisation des antennes intelligente pour augmenté le débit.....	46
2.4.3.	Optimisation du réseau grâce au bon emplacement des passerelles.....	47
2.4.4.	Utilisation multiples des passerelles .....	47
2.4.5.	Synthèse.....	48
2.5.	Conclusion .....	48

### **Chapitre III : Première contribution : Protocole de routage a base de Clusters dans les réseaux 802.11s**

3.1.	Introduction.....	50
3.2.	Problématiques et contraintes du routage dans le réseau Wifi maillé.....	50
3.3.	Classification des protocoles de routage.....	51
3.3.1.	Les protocoles de routage proactifs.....	52
3.3.1.1.	Protocole OLSR ( <i>Optimized Link State Routing</i> ).....	52
3.3.1.2.	Protocole DSDV ( <i>Destination Sequenced Distance Vector</i> ). .....	53
3.3.2.	Les protocoles de routage réactifs.....	53
3.3.2.1.	Protocole AODV ( <i>Ad-hoc On Demand Distance Vector</i> ).....	54
3.3.2.2.	Protocole DSR ( <i>Dynamic Source Routing</i> ).....	55
3.3.3.	Protocoles de routage Hybride et en clustering.....	55
3.3.3.1.	Protocole HWMP ( <i>Hybrid Wireless Mesh Protocol</i> ).....	55
3.3.3.2.	LEACH.....	56
3.3.3.3.	PEGASIS.....	56
3.3.3.4.	HEED.....	56
3.3.3.5.	TEEN.....	57
3.3.3.6.	CBRP.....	57
3.4.	Motivations.....	58
3.5.	Le protocole de routage CBRP.....	56
3.6.	Première contribution: le protocole CBRP étendu à la QoS (Q-CBRP).....	61
3.6.1.	Fonctionnement du Q-CBRP.....	62
3.7.	Évaluation des performances par simulation.....	63
3.7.1.	Environnement de simulation.....	63



3.8.	Discussion des résultats.....	64
3.8.1.	Taux de paquets reçu (PDR).....	65
3.8.2.	Délai moyen.....	66
3.8.3.	Surcharge du réseau (Overhead).....	68
3.9.	Conclusion.....	70

**Chapitre IV : Deuxième contribution : Algorithme robuste et efficace pour un transport multimédia via le wifi maillé**

4.1.	Introduction.....	71
4.2.	Introduction au standard IEEE 802.11e.....	72
4.2.1.	Mécanisme d'accès EDCA .....	72
4.3.	Limitations du 802.11e pour les applications multimédia.....	75
4.4.	Les travaux d'adaptation des paramètres des flux.....	76
4.5.	Le modèle proposé .....	78
4.6.	Scenario de Simulation .....	79
4.7.	Résultats et discussions.....	80
4.7.1.	Le Débit.....	81
4.7.2.	Perte de paquets.....	82
4.7.3.	Délai moyen.....	83
4.8.	Conclusion.....	84
	<b>Conclusion et perspectives .....</b>	<b>86</b>
	<b>Annexe.....</b>	<b>90</b>
	<b>Glossaire &amp; traductions.....</b>	<b>93</b>
	<b>Liste des Sigles et Abréviations.....</b>	<b>94</b>
	<b>Références.....</b>	<b>95</b>

# Liste des Tableaux

Tableau 2.1 : Résumé des approches au niveau de la couche réseau.....	29
Tableau 2.2 : Résumé des approches au niveau de la couche liaison.....	35
Tableau 2.3 : Résumé des approches au niveau de la couche physique.....	38
Tableau 3.1 : Comparaison entre les différents protocoles de routage en clustering.....	48
Tableau 3.2 : Paramètres de simulation.....	54
Tableau 4.1 : Priorités d'accès des différents flux dans le 802.11e.....	62
Tableau 4.2 : Les paramètres originaux de l'IEEE 802.11e .....	69
Tableau 4.3 : Les paramètres de simulations de notre scénario.....	70
Tableau 4.4 : Paramètres de simulation dans le standard 802.11e .....	70
Tableau 4.5 : Taux de perte de paquets en fonction du nombre de nœuds, MAC standard.....	72
Tableau 4.6 : Taux de perte de paquets en fonction de nombre des nœuds, MAC modifié.....	73

# Liste des figures

Figure 1.1. Communications dans un réseau WLAN maillé.....	7
Figure 1.2. Architecture en infrastructure des réseaux WMNs.....	8
Figure 1.3. Architecture Client des réseaux WMNs.....	9
Figure 1.4. Architecture hybride des réseaux WMNs.....	10
Figure 1.5. Accès au support CSMA/CA.....	14
Figure 1.6. Station cachée et détection virtuelle de la porteuse par RTS/CTS.....	15
Figure 1.7. Réservation du support avec les trames RTC/CTS.....	16
Figure 1.8. Les réseaux maillés pour la maison numérique.....	17
Figure 1.9. Les réseaux maillés pour les entreprises.....	18
Figure 1.10. Les réseaux maillés métropolitain.....	19
Figure 1.11. Classification des applications suivant leurs exigences en termes de QoS.....	21
Figure 3.1. Classification des protocoles de routage.....	41
Figure 3.2: Table des membres .....	49
Figure 3.3: Table des chefs de groupe (Cluster Head).....	49
Figure 3.4: Table de la passerelle (Gateway) .....	49
Figure 3.5. Correspondance entre le protocole CBRP et le standard 802.11s.....	50
Figure 3.6. En-tête du paquet des données.....	51
Figure 3.7: Table de la passerelle dans Q-CBRP.....	52
Figure 3.8. PDR en fonction du temps de pause pour 20 nœuds.....	55
Figure 3.9. PDR en fonction du temps de pause pour 40 nœuds .....	56
Figure 3.10. PDR en fonction du temps de pause pour 60 nœuds .....	56
Figure 3.11. Délai moyen en fonction du temps de pause pour 20 nœuds.....	57
Figure 3.12. Délai moyen en fonction du temps de pause pour 40 nœuds.....	58
Figure 3.13. Délai moyen en fonction du temps de pause pour 60 nœuds.....	58
Figure 3.14. Overhead en fonction du temps de pause pour 20 nœuds.....	59
Figure 3.15. Overhead en fonction du temps de pause pour 40 nœuds.....	59
Figure 3.16. Overhead en fonction du temps de pause pour 60 nœuds.....	60
Figure 4.1. Accès au média sans fil en mode EDCA (IEEE 802.11e).....	63
Figure 4.2. Simulation du débit en utilisant le Q-CBRP avec la couche MAC standard .....	71
Figure 4.3. Simulation du débit en utilisant le Q-CBRP avec la couche MAC modifié.....	72
Figure 4.4. Simulation of Average Delay using Q-CBRP with standard MAC layer .....	73
Figure 4.5. Simulation of Average Delay using Q-CBRP with standard MAC layer.....	74

## **i. CONTEXTE DE RECHERCHE**

Au cours des dernières années, la technologie de l'information et de la communication (TIC) a de plus en plus imprégné tous les aspects de notre vie quotidienne. La révolution informationnelle est due principalement au développement fulgurant des technologies de l'information qui permettent actuellement le traitement, le stockage et la transmission d'énormes quantités de données quasiment en temps réel. En plus, la numérisation des données et l'élaboration de nouveaux standards et de nouveaux composants électroniques de plus en plus petits et de plus en plus performants, ont permis aux réseaux de devenir numériques, sans fil et mobiles.

Avant la fin de cette décennie (2005-2015), les réseaux actuels à large bande peuvent aujourd'hui aller de l'échelle personnelle à l'échelle régionale et mondiale. Cela est rendu possible par toutes sortes de maillage informatique différent et des réseaux de communication [1].

Les réseaux locaux sans fil en particulier (WLAN: Wireless Local Area Network) ont vu ces dernières années un grand succès grâce à leur simplicité, rapidité et faible coût de déploiement. 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. Cependant, l'utilisation de ces réseaux est très efficace pour les services de données et elle doit être optimisée pour les services de la voix ou de la vidéo, en plus de la couverture qui, elle, reste faible (quelques centaines de mètres). Un utilisateur d'aujourd'hui exigeant et mobile peut très vite perdre la connexion, ce qui lui est très désagréable. Et justement pour étendre la couverture du WLAN classique, une nouvelle solution a été apportée, le réseau sans fil maillé.

Les réseaux maillés sans fil (WMN: Wireless Mesh Networks) sont une classe émergente des réseaux sans fil. Ils reprennent le principe d'un réseau sans fil à multiples-sauts, c'est-à-dire que les communications entre deux nœuds peuvent être supportées par plusieurs nœuds intermédiaires, appelés Mesh Router (MR) dont le rôle est de relayer l'information d'un point à un autre [1]. Ces MRs s'organisent d'une manière autonome de façon à former un réseau fédérateur maillé sans fil ("Backbone WMN"). Ils jouent également le rôle d'une passerelle/pont d'accès vers différentes technologies sans fil (réseaux WiFi, réseaux WiMax, réseaux cellulaires, réseaux de capteurs, réseaux privés sans fil, etc.). Les nœuds MRs ont une mobilité très réduite, voire nulle, définissant ainsi un réseau qui, par rapport aux nœuds des

réseaux ad hoc mobiles (MANET: Mobile Ad hoc Networks), n'ont ni contraintes d'autonomie en énergie, ni problèmes de maintien de la connectivité. Les réseaux maillés permettent d'intégrer plusieurs technologies sans fil et ont donc pour vocation de jouer le rôle d'un réseau d'accès vers l'Internet ou vers différents types de réseaux sans fil.

Les réseaux maillés sans fil sont donc amenés à être le support de communication d'une grande diversité d'applications ayant différentes exigences de qualité de service (QoS) en termes de délai, de débit, de fiabilité, de confidentialité, etc. Ces applications concernent de nombreux domaines, tels que la domotique, les systèmes embarqués, les systèmes de santé, etc. Par conséquent, de nombreuses applications peuvent être développées grâce à la technologie WMN. Plusieurs compagnies ont déjà commercialisé les produits des réseaux maillés dans le marché Télécom [1], [2].

Le problème de la garantie de la qualité de service n'est pas encore résolu à 100%, et donc plusieurs travaux de recherche sont en cours. Les travaux de cette Thèse constituent une contribution à ces efforts de recherche.

## **ii. MOTIVATIONS ET OBJECTIFS**

Bien que la recherche dans le domaine des réseaux maillés sans fil soit récente, elle est vaste et diversifiée. En effet, des travaux de recherche conséquents sont actuellement en train d'être effectués dans le but de normaliser un ou plusieurs protocoles, en particulier le routage pour les réseaux maillés sans fil.

En outre, de nombreux autres travaux portant sur des protocoles promulguant la qualité de service, la découverte de services, l'auto configuration, l'auto organisation, la sécurité, etc. sont en cours de réalisation. Ces recherches s'appuient sur des travaux utilisant en particulier la norme 802.11 de l'IEEE ou son extension directe 802.11e. De plus, l'IETF en 2007-2009, a adopté le standard IEEE 802.11s, qui est le standard du réseau wifi maillé et qui utilise une méthode d'accès déterministe optionnelle, spécifique aux WMNs.

Bien que le standard 802.11e a introduit des mécanismes qui assurent la qualité de service, en faisant la différenciation du trafic selon la priorité des applications, la solution apportée n'est pas satisfaisante à 100%, encore moins directement adaptée au réseau maillé.

Ainsi, l'objectif des travaux de cette Thèse est de contribuer à la définition d'une solution pour le support de la QoS dans le réseau fédérateur Wifi maillé, ainsi qu'à l'analyse des performances de cette solution. Le travail se situe plus précisément au niveau de la couche

réseau et de la sous-couche MAC (Medium Access Control). D'une part, nous avons spécifié, implémenté, puis évalué un protocole de routage de l'état de l'art, auquel nous avons ajouté des extensions, pour l'adapter à notre réseau, puis nous l'avons simulé sous NS2 pour démontrer ses performances. D'autre part, nous avons proposé des mécanismes de gestion de ressources, tout en garantissant la QoS, afin d'améliorer le service différencié proposé par le standard 802.11e. Pour ce faire, nous avons étudié les performances de plusieurs protocoles de routage spécifiques aux réseaux MANET et Ad hoc, afin d'en choisir le plus approprié aux réseaux maillés, pouvant promulguer la QoS.

En effet, les résultats de nombreux travaux de recherche sur le routage dans les réseaux ad hoc ou bien MANET peuvent être réutilisés mais avec certaines adaptations et extensions, car ils ont été conçus principalement avec le souci d'optimiser la consommation d'énergie et la prise en charge d'une forte mobilité des nœuds. Cependant, ces aspects sont moins importants dans le cadre du réseau 802.11s. Par conséquent, beaucoup de perspectives sont à entreprendre pour ce type de réseaux.

### **iii. ORGANISATION DE LA THESE**

Afin de mettre en exergue la problématique traitée et exposer nos contributions, nous avons organisé cette thèse en quatre chapitres:

Dans le premier chapitre, nous introduisons le standard 802.11s avec ses caractéristiques. Nous définissons ensuite la notion de QoS, qui est au cœur et l'essence même de nos travaux de recherche.

Au chapitre deux, nous résumons les solutions apportant la QoS, existant déjà dans la littérature pour les trois couches basses de l'OSI, en l'occurrence, la couche réseau avec ses protocoles de routage, la sous couche MAC avec ses mécanismes de qualité de services et la couche physique avec l'aspect déploiement et robustesse des communications.

Le troisième chapitre détaille notre première contribution, consistant en un algorithme de routage (Q-CBRP). Il est suivi d'une discussion sur les résultats de simulation de notre proposition.

Dans le dernier chapitre, nous introduisons d'abord les mécanismes proposés et adoptés par le standard 802.11e pour garantir la QoS. Puis une discussion sur les résultats de simulation, consistant en une comparaison de notre algorithme de routage renforcé par un mécanisme en couche deux, que nous avons adapté à notre réseau maillé, avec le même algorithme sans les adaptations.

Enfin, une conclusion générale résume les contributions majeures de cette thèse et expose les perspectives.

## 1.1. Introduction

La mobilité des utilisateurs et leurs besoins d'accès itinérant aux réseaux informatiques rendent les réseaux traditionnels (filaires) 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 fil allant des réseaux personnels à faible couverture jusqu'aux réseaux à couverture mondiale. Dans notre étude, nous nous intéressons au standard 802.11s, le réseau maillé sans fil (WMN: Wireless Mesh Networks), qui est considéré comme une technologie émergente clé pour les réseaux prochaine génération (NGN: Next Generation Network).

Dans le réseau maillé, les nœuds sont constitués de routeurs et de clients, formant un maillage entre eux (Mesh). Chaque nœud fonctionne non seulement comme un hôte, mais également comme un routeur, dans le sens où il peut relayer les paquets des autres hôtes. Le réseau maillé est dynamique, auto-organisé et auto-configuré: les nœuds dans le réseau peuvent automatiquement établir et maintenir la connectivité entre eux, en raison du maillage existant entre eux (en créant, en effet, un réseau ad hoc). Ces caractéristiques font les nombreux avantages du réseau maillé, tels que le faible coût de déploiement, la facilité d'entretien et d'utilisation, la robustesse face aux changements et aux pannes et la garantie de la QoS.

Le réseau maillé est une technologie prometteuse pour de nombreuses utilisations où le sans fil est très utile, voir indispensable. Nous citons entre autre les réseaux haut débit à domicile, les réseaux de voisinage, les réseaux d'entreprise, etc.

Le déploiement de cette technologie est assez simple, car tout ce qui est nécessaire à sa mise en place est déjà disponible et prêt à l'usage, du fait qu'il utilise des technologies déjà existantes et très utilisées, en y introduisant une variance tout aussi simple. Plusieurs pays ont déjà pris conscience du potentiel de cette technologie et ont déjà mis sur leur marché des produits sans fil de réseau maillé. En plus, quelques bancs d'essai ont été mis en place dans des laboratoires de recherche universitaires. Cependant, des efforts de recherches sont encore nécessaires: les protocoles de communications (allant de la couche Application à la couche Transport), les protocoles de routage, les protocoles de la sous couche MAC et les caractéristiques de la couche physique doivent être revus et améliorés [3]. Les travaux de cette



thèse s'inscrivent dans cette optique, et spécialement dans l'amélioration du routage et du fonctionnement de la sous couche MAC.

Plusieurs technologies sans fil peuvent supporter le maillage de leur réseau, on cite le standard IEEE 802.15.4 (ZigBee) destiné pour les réseaux personnels (WPAN: Wireless Personal Area Network), la norme IEEE 802.11 dédiée aux réseaux locaux (WLAN: Wireless Local Area Network) et la norme IEEE 802.16 adéquate aux réseaux métropolitains (WMAN: Wireless Metropolitan Area Network). Dans notre thèse nous nous intéressons au réseau Wifi maillé (Wifi Mesh) dicté par le standard IEEE 802.11s.

## **1.2. Le standard IEEE802.11s**

Le 802.11s est une évolution des réseaux 802.11 qui facilite la formation d'un réseau maillé entre des points d'accès 802.11, dans l'optique d'étendre la couverture du réseau WLAN. Un réseau maillé est un réseau multisaut basé sur une infrastructure contrairement à un réseau Ad hoc (MANET: Mobile Ad hoc Network) qui lui ne nécessite aucune infrastructure. Il offre naturellement un accès sans fil, avec un coût attractif et des débits élevés.

Le groupe IEEE 802.11s a été créé en Janvier 2004 pour offrir les fonctionnalités du maillage aux architectures et protocoles de la famille IEEE 802.11. Il spécifie les amendements nécessaires au niveau des couches MAC et physique pour la création d'un système de distribution sans fil à base de la technologie IEEE 802.11.

Dans les réseaux WLAN non maillés, les stations (STAs) doivent s'associer à un point d'accès (AP) afin d'accéder au réseau. Ces STAs dépendent de ce point d'accès avec lequel ils se sont associés pour communiquer (*Figure 1.1*). Dans un réseau maillé les APs peuvent communiquer entre eux directement sur un lien sans fil et sans l'intermédiaire d'un réseau externe [4].

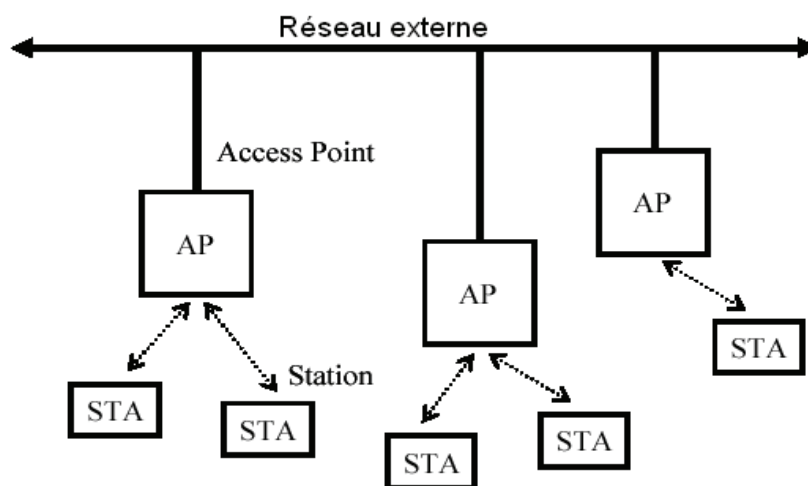


Figure 1.1. Communications dans un réseau WLAN maillé.

### 1.3. Architecture des réseaux maillés

Les réseaux maillés se composent de deux types de nœuds: les routeurs maillés et les clients maillés. Un routeur maillé sans fil assure des fonctions de routage supplémentaires nécessaires au fonctionnement des réseaux maillés, couvrant les trois couches d'OSI. Afin d'améliorer encore la flexibilité des réseaux maillés, un routeur maillé est généralement équipé de plusieurs interfaces sans fil, pouvant être des technologies d'accès sans fil hétérogènes. Par rapport à un routeur sans fil classique, un routeur maillé sans fil peut atteindre la même couverture avec une puissance d'émission beaucoup plus faible dans les communications multisauts. En option, le protocole CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance) dans un routeur maillé est amélioré, pour supporter une meilleure évolutivité (passage à l'échelle) dans un environnement maillé multisauts [3].

Les clients maillés ont également des fonctions de routage dans le réseau lui-même, pour relayer les paquets d'autres clients. Toutefois, les fonctionnalités de passerelle inter technologie ou pont ne sont pas supportées par ces nœuds clients.

En outre, les clients maillés ont généralement une seule interface sans fil. En conséquence, la plate-forme matériel et logiciel pour les clients peut être beaucoup plus simple que celle des routeurs. Ainsi les clients ont une plus grande variété d'appareils par rapport aux routeurs. Ils peuvent être un ordinateur portable, PC de bureau, PC de poche, PDA, téléphone IP, lecteur RFID et de nombreux autres dispositifs. L'architecture des réseaux maillés en général peut être classée en trois groupes principaux basés sur l'utilité du réseau maillé.

### 1.3.1. Infrastructure/Backbone WMNs

L'architecture Infrastructure/Backbone est représentée dans la *figure 1.2*, où les pointillés et les lignes pleines indiquent respectivement une communication sans fil et une liaison filaire. Ce type de réseau contient des routeurs maillés formant une infrastructure pour les clients qui se connectent à eux.

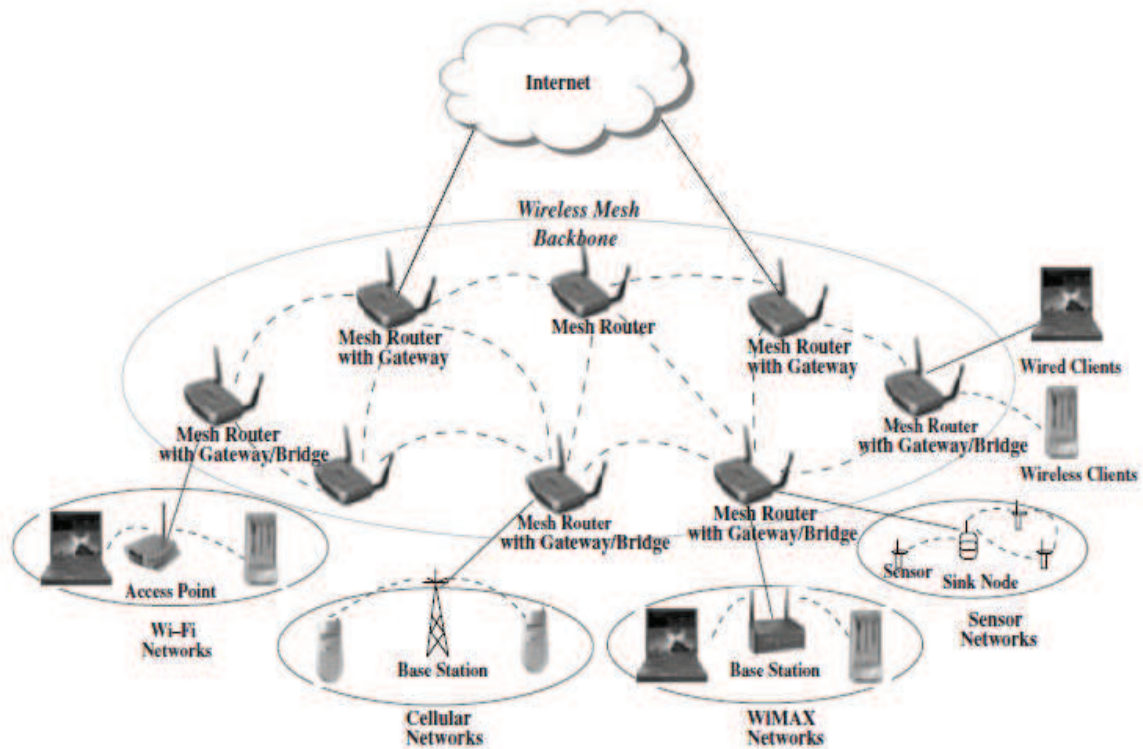


Figure 1.2. Architecture en infrastructure des réseaux WMNs

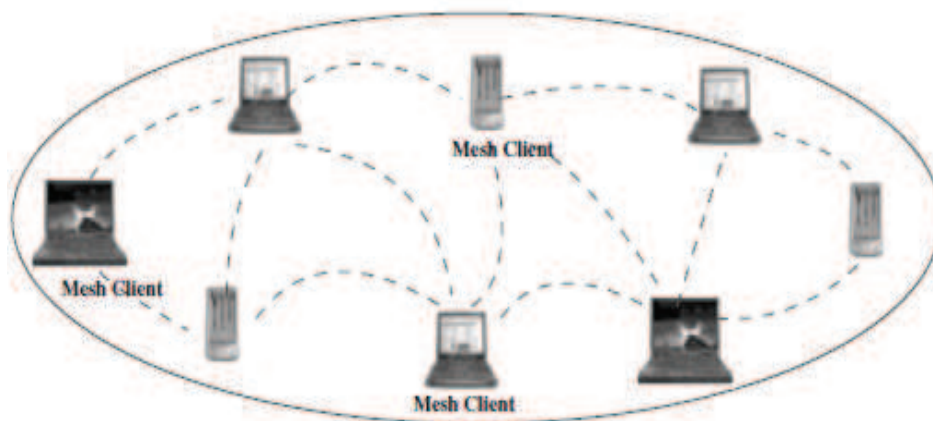
L'architecture étudiée peut être construite en utilisant différents types de technologies radio, en plus de la technologie Wifi qui est la plus utilisée. Les routeurs maillés communiquent entre eux à travers des liens sans fil, chose qui n'existe pas dans le réseau wifi standard.

Avec une fonctionnalité de passerelle, les routeurs maillés peuvent être connectés à Internet. Cette approche fournit une épine dorsale pour les clients classiques et permet l'intégration des réseaux maillés avec les réseaux sans fil, par le biais de la passerelle. Les Clients traditionnels avec une interface Ethernet peuvent être connectés à des routeurs maillés via des liaisons Ethernet. Pour les clients classiques avec des technologies radio, ils peuvent communiquer directement avec ces routeurs. Si ces différentes technologies radio sont utilisées, les clients doivent communiquer avec les passerelles correspondantes intégrées dans les routeurs maillés.

L'architecture en infrastructure est le type le plus utilisé généralement. Les routeurs maillés sont placés sur les toits des maisons dans un voisinage, et ceux-ci peuvent servir de points d'accès aux utilisateurs dans les maisons.

### 1.3.2. Clients maillés

Le maillage des clients peut servir à fournir des communications Peer-to-Peer entre eux. Dans ce type d'architecture, le réseau n'est constitué que des nœuds clients, qui donc doivent être en mesure d'exécuter les fonctionnalités de routage et de configuration. Par conséquent, un routeur maillé n'est pas nécessaire pour ce type de réseau. L'architecture de base est montrée sur la *figure 1.3*. Dans cette architecture, un paquet destiné à un autre nœud dans le réseau fait des sauts multiples pour atteindre la destination.



*Figure 1.3. Architecture Client des réseaux WMNs*

### 1.3.3. Réseau maillé hybride

Cette architecture est la combinaison entre la première et la deuxième architecture comme il est indiqué sur la *figure 1.4*. Les clients maillés peuvent accéder au réseau par les routeurs maillés ou communiquer directement avec d'autres clients. Tandis que l'infrastructure fournit la connectivité à d'autres réseaux tels que le réseau Internet, Wifi, WiMAX, GSM,... L'architecture hybride est le cas le plus utilisé dans les réseaux métropolitains sans fil.

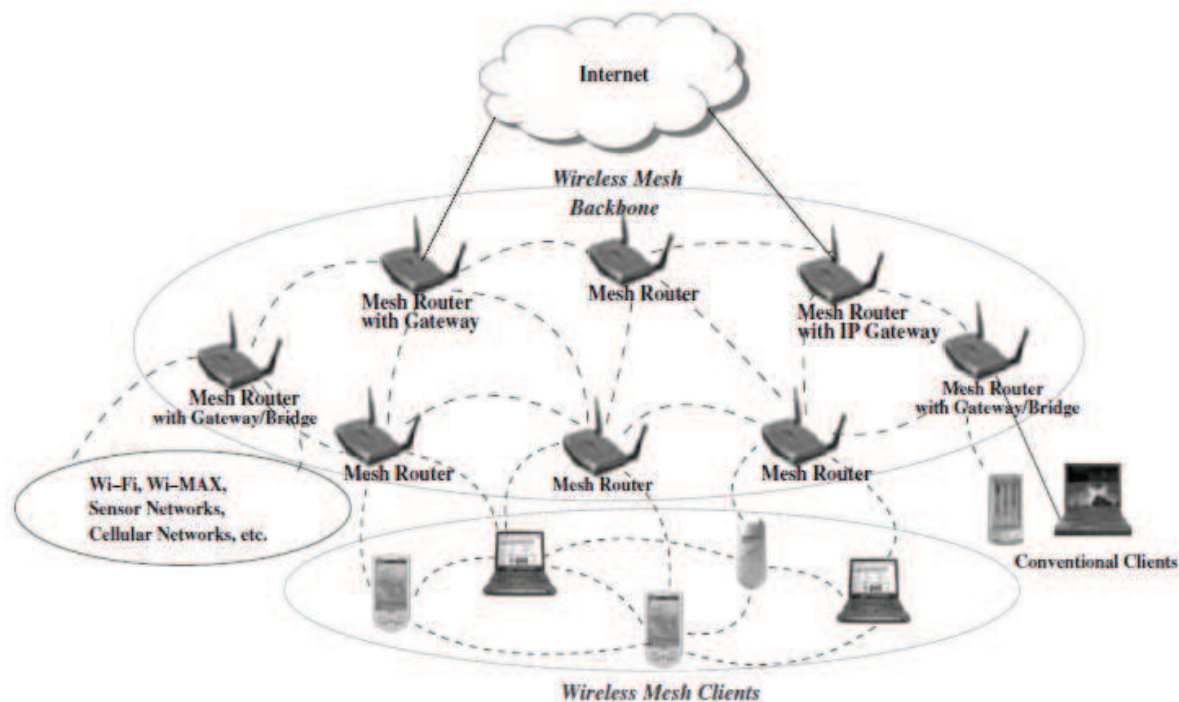


Figure 1.4. Architecture hybride des réseaux WMNs

## 1.4. Caractéristiques

Les caractéristiques du réseau maillé sont résumées dans les points suivants [3]:

- a- **Un réseau à multisauts:** Une incitation à développer les réseaux maillés est d'étendre la zone de couverture des réseaux sans fil actuels sans compromettre la capacité du canal. Un autre objectif majeur des réseaux maillés est de fournir une connectivité directe entre les utilisateurs. Pour répondre à ces exigences, le multisaut est indispensable. Il permet aussi de réduire les interférences entre les nœuds et de réutiliser les fréquences les plus efficaces.
- b- **Support des réseaux ad hoc et capacité d'auto-formation, d'auto-réparation et d'auto-organisation:** Les réseaux ad hoc améliorent les performances du réseau et apportent la facilité du déploiement et de la configuration, la tolérance aux pannes et la connectivité. Grâce à ces caractéristiques, les réseaux maillés se déploient facilement et le réseau peut se développer et s'étendre graduellement selon les besoins.
- c- **La mobilité dépend des types de nœud:** les routeurs maillés ont généralement une mobilité minimale, tandis que les clients peuvent être des nœuds fixes ou mobiles.
- d- **Plusieurs types d'accès au réseau:** Dans les réseaux maillés, l'accès à la fois à l'Internet et aux communications Peer-to-Peer (P2P) au sein des réseaux maillés sont prises en charge. En outre, l'intégration des réseaux maillés avec d'autres réseaux sans

fil de technologie hétérogène est possible et fournit des services supplémentaires aux utilisateurs finaux de ces réseaux.

- e- **La consommation d'énergie:** les routeurs maillés n'ont pas de contraintes strictes sur la consommation d'énergie, puisque étant peu ou pas mobiles, ils sont donc généralement alimentés en énergie. Toutefois, les clients maillés peuvent nécessiter des protocoles efficaces en économie d'énergie.
- f- **Compatibilité et interopérabilité avec les réseaux sans fil existants:** Le réseau maillé construit sur la base des technologies IEEE 802.11, doit être compatible avec les normes IEEE 802.11. Les réseaux maillés ont aussi besoin d'être interopérables avec d'autres réseaux sans fil comme le WiMAX, ZigBee et les réseaux cellulaires.
- g- **Intégration:** Le réseau maillé supporte de nouveaux utilisateurs, à condition qu'ils soient dotés de la même interface radio que le routeur maillé. Les réseaux maillés permettent également l'intégration des différents réseaux existants, tels que le WiFi, l'Internet, les réseaux cellulaires et les réseaux de capteurs via des passerelles. Les réseaux sans fil intégrés par le biais des réseaux maillés ressemblent à la dorsale d'Internet, puisque l'emplacement physique des nœuds du réseau est moins important que sa capacité.
- h- **Mobilité:** La topologie et la connectivité du réseau dépendent de la mobilité des usagers. Cela impose des défis supplémentaires pour les protocoles de routage et de configuration, ainsi que pour le déploiement du réseau. Comme les routeurs maillés fournissent l'infrastructure des réseaux maillés, la couverture du réseau peut être conçue facilement, tout en supportant la mobilité des utilisateurs finaux.
- i- **Compatibilité:** les réseaux maillés contiennent de nombreuses différences par rapport aux réseaux Ad hoc. Toutefois, comme indiqué plus haut, les réseaux Ad hoc peuvent être considérés comme un sous-ensemble des réseaux maillés. Plus précisément, les techniques existantes développées pour les réseaux Ad hoc sont déjà applicables dans les réseaux sans fil maillés.

### 1.5. Fonctionnement du Wifi maillé IEEE 802.11s

Le fonctionnement du 802.11s est similaire à la norme 802.11b sauf que le 802.11s utilise les trois couches basses du modèle OSI alors que les autres standards ne fonctionnent qu'avec les deux couches inférieures. Dans la section suivante, nous allons détailler les fonctionnalités des trois niveaux de telle sorte que nous puissions exploiter ces caractéristiques dans la mise



au point de notre solution de routage associée à un mécanisme spécifique dans la sous-couche MAC.

### **1.5.1. Couche physique**

La couche physique définit la modulation des ondes radioélectrique et les caractéristiques de la signalisation pour la transmission de données. La couche physique est divisée en deux sous-couches: la couche PLCP (Physical Layer Convergence Protocol) et la couche PMD (Physical Medium Dependent). La couche PMD définit les caractéristiques de la couche physique employée à savoir les techniques de transmissions utilisées (FHSS, DSSS ou OFDM). La couche PLCP permet la liaison entre la couche PMD et la couche MAC et a pour principal rôle la gestion des trames (encapsulation, décapsulation, etc). Elle permet aussi d'envoyer à la couche MAC des rapports d'erreur ou encore lui signifier si le support est libre ou non [5].

### **1.5.2. Couche liaison des données**

La couche liaison de données est composée de deux sous-couches:

- ✓ La sous-couche de contrôle de liaison logique (LLC: Logical Link Control).
- ✓ La sous-couche de contrôle d'accès au support (MAC: Medium Access Control).

#### **1.5.2.1. Sous-couche LLC**

La sous-couche LLC 802.11 est totalement identique à la sous-couche LLC 802.2. Son but est de permettre aux protocoles réseaux de niveau 3 (par exemple IP) de reposer sur une couche unique (la couche LLC) quel que soit le protocole sous-jacent utilisé, dont le Wifi ou l'Ethernet, par exemple. Tous les paquets de données Wifi transportent donc un paquet LLC. Il est possible d'avoir en même temps, sur un même réseau trois protocoles de niveau trois.

#### **1.5.2.2. Sous-couche MAC**

Elle indique comment les différents utilisateurs doivent se partager la parole, le format des paquets échangés, les topologies possibles, les modalités exacte de connexion au réseau sans fil. Elle définit aussi les modalités avancées telle que la sécurité de communication, l'économie d'énergie, le contrôle d'erreur ou encore la qualité de service. Cette sous-couche représente en quelque sorte le cerveau de Wifi [6].

La sous-couche MAC intègre les mêmes fonctionnalités que la sous-couche MAC 802.3, à savoir :

- ✓ La procédure d'allocation du support.
- ✓ L'adressage des paquets.
- ✓ Le formatage des trames.
- ✓ Le contrôle d'erreurs.

En plus de ces fonctions habituellement assurées par la sous-couche MAC, la sous-couche MAC 802.11 offre d'autres fonctions qui sont normalement confiées aux protocoles supérieurs, comme :

- ✓ La fragmentation et réassemblage.
- ✓ Les retransmissions des paquets.
- ✓ Les accusés des réceptions [6].

### ❖ Méthodes d'accès au support

La sous-couche MAC définit deux fonctions de coordination des échanges correspondant à deux méthodes d'accès différentes:

- ✓ PCF (Point Coordination Function) est basé sur l'interrogation à tour de rôle des terminaux (polling) par l'AP. Ce mode utilisé en alternance avec un mode distribué (DCF) est conçu pour des applications de type temps réel, telle que la voix et la vidéo.
- ✓ DCF (Distributed Coordination Function) n'est pas fondée sur une gestion centralisée et permet la prise en charge du transport de données asynchrones avec des chances égales pour toutes les stations d'accéder au support (type best effort). Un réseau ad hoc utilise uniquement le DFC. La méthode DCF comprend quatre mécanismes, à savoir: 1) CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance); 2) algorithme "Backoff"; 3) principe de réservation du média; et 4) détection virtuelle des collisions.

Les liaisons radio n'étant pas full duplex, une méthode de détection de collision de type CSMA/CD (CSMA Collision Detection) ne peut être utilisée dans la mesure où une station ne peut être à l'écoute du support pendant son émission. Un mécanisme d'écoute de porteuse avec évitement de collision et acquittement, basé sur la méthode d'accès CSMA/CA, est donc utilisé.



Une station voulant transmettre, écoute le support. S'il est occupé, la transmission est différée. Si le support est libre pendant un temps supérieur au DIFS (DCF Inter Frame Spacing), la station est autorisée à transmettre. La station réceptrice va vérifier le CRC du paquet reçu et renvoie un accusé de réception ACK. La réception de l'ACK indiquera à l'émetteur qu'aucune collision n'a eu lieu. Si l'émetteur ne reçoit pas l'accusé de réception, alors il retransmet la trame jusqu'à ce qu'il obtienne un accusé ou abandonne au bout d'un certain nombre de retransmission.

Pour séparer les transmissions au sein d'un même dialogue (données, ACK...) un temps inter-trame plus fiable SIFS (Short IFS) est suffisant dans la mesure où seule une station est susceptible d'émettre à cet instant (émetteur ou récepteur en cours). Un troisième temps inter-trame PIFS (PCF IFS) inférieur au DIFS peut être utilisé par l'AP pour accéder prioritairement au support.

Pour une collision, les stations qui entendent une transmission en cours utilisent un temporisateur, régulièrement mis à jour, traduit par le NAV (Network Allocation Vector) calculé en fonction du temps, délai contenu dans les trames émises. Les stations, voulant émettre et trouvant le support encore occupé après le temps DIFS, attendent donc un temps correspondant au NAV (durée théorique de l'occupation) augmentée d'un niveau DIFS (*figure 1.5*). Au bout de ce temps d'attente, les stations ne cherchent pas à émettre toutes en même temps et évitent les collisions en attendant **chacune** un temps supplémentaire aléatoire suivant un algorithme de Backoff.

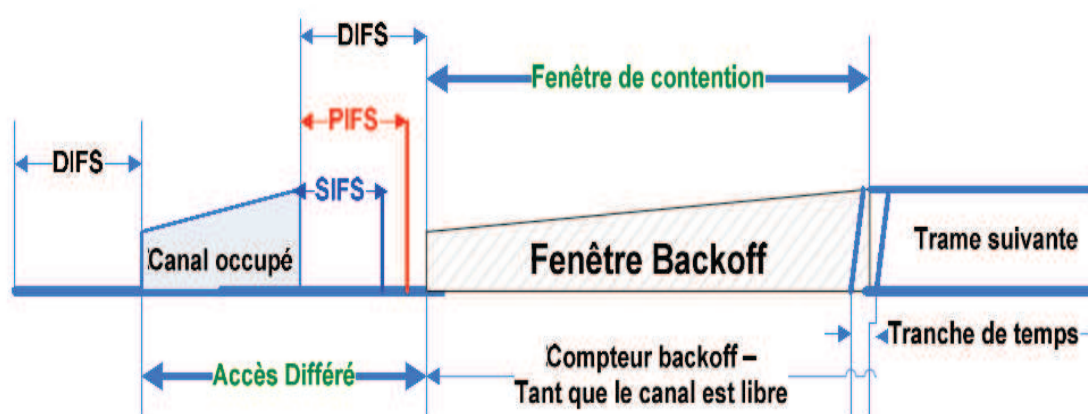


Figure 1.5. Accès au média sans fil en mode DCF (IEEE 802.11)

L'algorithme de Backoff est basé sur la gestion de time-slot correspondant à des tranches de temps fixées par la couche physique. Initialement une station calcule en nombre de time-slot les valeurs d'un temporisateur (time Backoff) compris entre 0 et CW max (Contention

Window). Lorsque le support est libre pendant un temps supérieur au DIFS, la station décrémente son temporisateur jusqu'à ce que le support soit occupé par une autre station avec Timer plus faible (la décrémentation est suspendue) ou que son propre temporisateur expire. Si deux stations tirent le même nombre de time-slots, la collision ne peut être évitée, elle est alors détectée par l'absence de l'ACK [7].

#### ❖ Cas de la station cachée

Si une station A envoie des données vers une station B. Au même moment une autre station C, hors portée de la station A mais dans le voisinage de B, communique avec cette dernière (Figure 1.6), ce scénario provoque une collision qui ne peut être évitée par la méthode CSMA/CA.

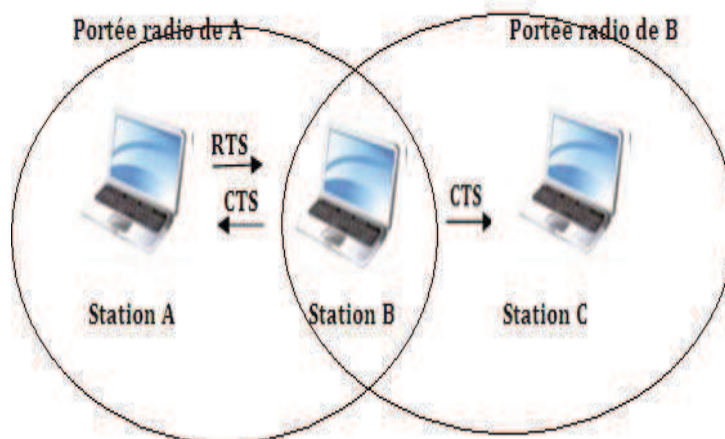


Figure 1.6. Station cachée et détection virtuelle de la porteuse par RTS/CTS

Pour résoudre ce problème, la norme 802.11 a défini le mécanisme de VCS (Virtual Carrier Sense). Il est comparable à l'écoute du support effectué au niveau physique (PCF, Physical Carrier Sense). Une station voulant émettre transmet d'abord une petite trame (30 octets) de contrôle RTS (Request To Send). Toutes les stations qui entendent le RTS mettent à jour leurs NAV en fonction du champ durée du RTS. La station destination concernée répond après l'attente d'un temps SIFS avec une trame courte CTS (Clear To Send). Le NAV est de nouveau mis à jour par la station entendant le CTS. Après réception du CTS par la station source, celle-ci est assurée que le support est réservé pour sa transmission pendant un temps au moins égal au NAV [8] (figure 1.7).

Par ailleurs, les stations cachées seront prévenues d'une émission en cours (dans l'exemple précédent, la station C qui aura entendu le CTS émis par B différera sa transmission). Ce mécanisme permet donc d'une part de réserver le support pendant un temps paramétrable et

de résoudre le problème de la station cachée. Il n'évite cependant pas les collisions de RTS ou de CTS, mais celles-ci sont moins coûteuses que des collisions de longues trames de données.

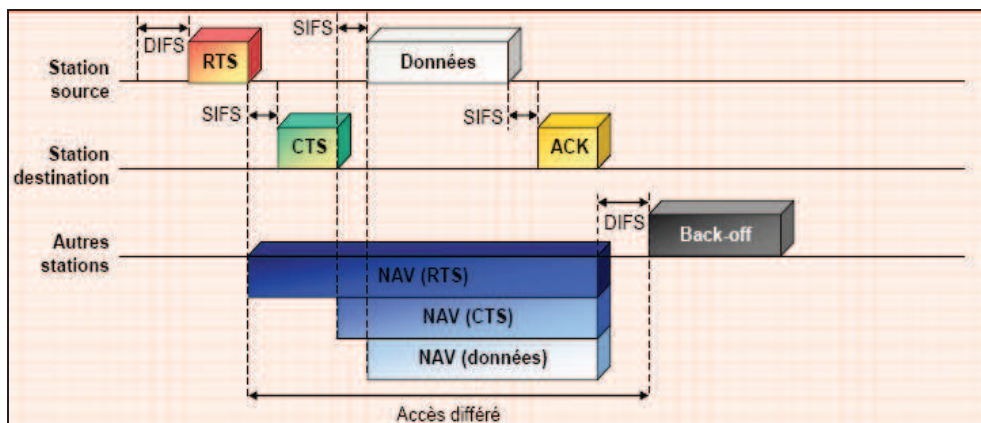


Figure 1.7. Réserve du support avec les trames RTC/CTS

Le mode DCF supporte les services de type "Best Effort" uniquement, sans aucune garantie de QoS. En effet, les différents types de trafics dans DCF ont la même probabilité d'accès au média. Aucun mécanisme de différenciation n'est implémenté afin de garantir le débit, le délai de transfert ni la gigue pour les applications avec des contraintes temporelles et de hautes priorités. Certains travaux [63] se sont intéressés à l'équité de ce protocole d'accès au média en plus de l'évaluation de ses performances. Pour une configuration simple, tel qu'un réseau à un saut, le protocole permet à chaque émetteur d'accéder au média avec la même probabilité. Il en résulte que ce protocole fournit une certaine équité en termes de nombre de trames émises. Cependant, il n'y a aucune garantie sur le volume de données effectivement transmis. En effet, la taille des trames n'est pas prise en compte dans la probabilité d'accès au média. Par ailleurs, des différences dans la topologie, telles que l'existence de zones plus denses que d'autres ou encore la présence d'interférences entre différents trafics peuvent avoir un impact important sur la probabilité de transmission avec succès des différents émetteurs dans une configuration à multiples-sauts, tel le cas des WMNs. Une différenciation de services s'avère impérative pour une meilleure performance réseau dans les WMNs, surtout pour les applications multimédia temps réel.

### 1.5.3. Couche réseau

Dans la couche réseau, le routage est l'une des fonctions principales de cette couche, ses protocoles ont une ressemblance avec les protocoles utilisés dans les réseaux Ad hoc. Les principaux protocoles utilisés dans les réseaux maillés en général, dans le Wifi maillé en particulier, seront détaillés lors du chapitre trois.

## 1.6. Les Applications des réseaux maillés

Les recherches et le développement des réseaux maillés sont motivés par plusieurs applications qui démontrent clairement le marché prometteur. Dans cette section, nous discutons ces applications [3].

### 1.6.1. Réseau domestique haut débit

Actuellement le réseau domestique haut débit est réalisé par la technologie WLAN IEEE 802.11. Un problème évident est l'emplacement des points d'accès. Sans une étude de site, une maison (même petite) a généralement beaucoup de zones d'ombres (sans couverture radio). La solution basée sur l'installation de points d'accès multiples est cher et pas pratique en raison du câblage Ethernet à partir des points d'accès au modem d'accès ou Hub du réseau. Les réseaux maillés, comme le montre la *figure 1.8*, peuvent résoudre tous ces problèmes dans un réseau domestique. Les points d'accès doivent être remplacés par des routeurs maillés sans fil avec une connectivité réseau établie entre eux. Par conséquent, la communication entre ces nœuds devient beaucoup plus souple et plus robuste aux pannes de réseau et des échecs de liaison. Des zones d'ombres peuvent être éliminées en ajoutant des routeurs maillés, en changeant l'emplacement des routeurs maillés, ou par un réglage automatique de la puissance des routeurs maillés.

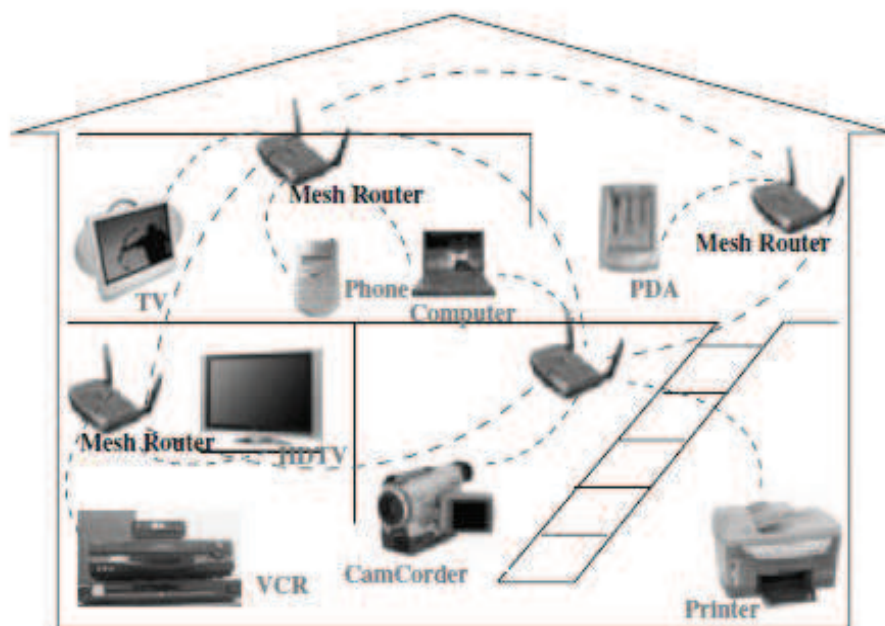


Figure 1.8. Les réseaux maillés pour la maison numérique

La communication au sein des réseaux domestiques peut être réalisée par le biais de réseaux maillés sans revenir sur le moyen d'infrastructure tout le temps. Ainsi, la congestion du réseau

à cause de l'accès, peut être évitée. Dans cette application, les routeurs maillés sans fil n'ont pas de contraintes sur les consommations d'énergie et de mobilité. En conséquence, les réseaux maillés en générale sont bien adaptés pour les réseaux domestiques à haut débit [3].

### 1.6.2. Réseau d'entreprise

Cela peut être un petit réseau dans un bureau ou un réseau de taille moyenne pour l'ensemble des bureaux dans tout le bâtiment, ou d'un réseau à grande échelle entre les bureaux dans plusieurs bâtiments. Actuellement le standard IEEE 802.11 est largement utilisé dans les différents bureaux. Cependant, ces réseaux sans fil sont encore isolés. Les connexions entre eux doivent être atteintes grâce à des connexions Ethernet câblées, qui est la principale raison du coût élevé des réseaux d'entreprise. En outre, l'ajout des modems d'accès ne fait qu'accroître les capacités locales, mais il n'améliore pas la robustesse aux pannes de liens, la congestion du réseau et d'autres problèmes du réseau d'entreprise.

Si les points d'accès sont remplacés par des routeurs Mesh, comme le montre la *figure 1.9*, les liaisons filaires peuvent être éliminées. Ainsi, plusieurs points d'accès peuvent être partagés par tous les nœuds du réseau pour améliorer l'utilisation des ressources et rendre les réseaux d'entreprise WMNs robustes. Ces derniers peuvent se développer facilement une fois que la taille de l'entreprise devient importante [3].

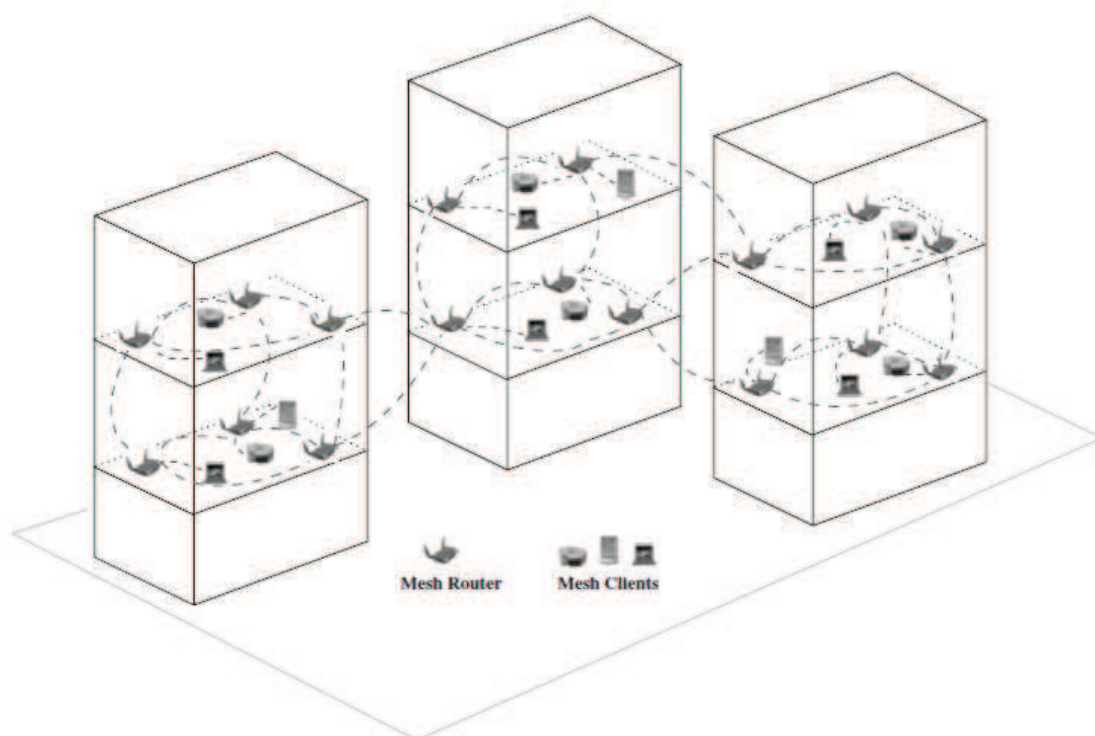


Figure 1.9. Les réseaux maillés pour les entreprises



### 1.6.3. Réseau métropolitain (WMAN)

Les réseaux maillés dans une région métropolitaine WMAN (Wireless Metropolitan Area Networks) ont plusieurs avantages. Le taux de transmission de la couche physique d'un nœud dans les réseaux maillés est beaucoup plus élevé que dans les systèmes cellulaires. Par exemple, un port IEEE 802.11g peut transmettre à un débit de 54 Mbps. De plus, la communication entre les nœuds du maillage ne repose pas sur un réseau fédérateur câblé. Par rapport aux réseaux câblés, par exemple, le câble ou les réseaux optiques, le réseau maillé est une alternative économique aux réseaux à large bande, en particulier dans les régions sous-développées. Le WMAN couvre une zone potentiellement plus grande qu'une maison, entreprise, bâtiment ou les réseaux communautaires, comme le montre la *figure 1.10*. Ainsi, l'exigence sur l'évolutivité du réseau WMN est beaucoup plus élevée que pour d'autres applications [3].

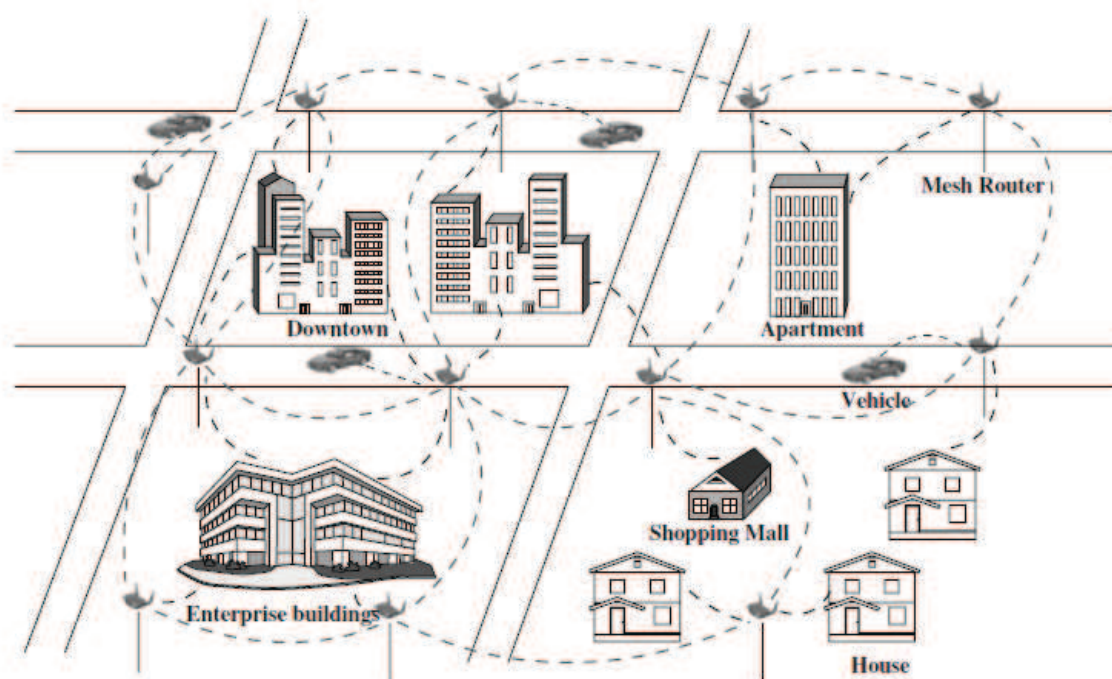


Figure 1.10. Les réseaux maillés métropolitain

### 1.6.4. Systèmes médicaux et de santé

Dans un hôpital ou un centre médical, des données de surveillance et de diagnostic doivent être traitées et transmises d'une pièce à l'autre. La transmission des données est généralement large bande, car les images médicales à haute résolution et diverses informations de suivi périodique peuvent facilement produire un volume important de données. Les réseaux filaires traditionnels ne peuvent fournir un accès réseau limité à certains dispositifs médicaux fixes.

Des réseaux Wifi doivent se fonder sur l'existence de connexions Ethernet, ce qui peut causer un coût élevé et une complexité du système. Cependant, ces problèmes n'existent pas dans les réseaux maillés [3].

#### **1.6.5. Sécurité et systèmes de télésurveillance**

Comme la sécurité est en passe de devenir un sujet de préoccupation très élevée, les systèmes de télésurveillance et de sécurité sont devenus une nécessité pour les bâtiments d'entreprise, les centres commerciaux, les banques, etc. Afin de déployer ces systèmes dans des endroits vulnérables, les réseaux maillés constituent une solution beaucoup plus intéressante pour connecter tous les périphériques. Puisque les images fixes et les vidéos constituent le trafic majeur circulant dans le réseau, ces applications exigent une capacité du réseau beaucoup plus élevée que d'autres applications [3].

En plus de ces applications, les réseaux maillés peuvent également être employés dans des applications spontanées (urgences/catastrophes). Par exemple, les réseaux sans fil sont fiables pour une équipe d'intervention d'urgence et des pompiers qui n'ont pas connaissance au préalable du lieu où le réseau doit être déployé. En plaçant simplement les routeurs maillés sans fil dans des endroits souhaités, un WMN peut être rapidement mis en place. Pour un groupe de personnes détenant des dispositifs avec une capacité de mise en réseau sans fil, par exemple, les ordinateurs portables et des PDA, les communications P2P est une solution efficace pour le partage de l'information n'importe quand et n'importe où. Les réseaux maillés sont en mesure de répondre à cette demande. Le WMN peut accomplir toutes les fonctions offertes par les réseaux ad hoc.

#### **1.7. Qualité de service dans les réseaux maillés sans fil**

Dans les réseaux de télécommunications, l'objectif de la qualité de service (QoS: Quality of Service) est d'atteindre un meilleur comportement de la communication, pour que le contenu de celle-ci soit correctement acheminé et que les ressources du réseau soient utilisées de façon efficace [9]. La QoS peut être définie comme le degré de satisfaction d'un utilisateur des services fournis par un système de communication.

Le RFC 2386 [10] caractérise la QoS comme un ensemble de besoins à assurer par le réseau pour le transport d'un trafic d'une source à une destination. Ces besoins peuvent être traduits

en un ensemble d'attributs pré-spécifiés et mesurables en termes de:

- délai de bout en bout,
- variance de délai,
- bande passante,
- pertes de paquets.

Les besoins de la QoS sont différents selon le type de l'application. Par exemple, pour les applications temps réel, comme la voix et la vidéo, le délai de bout en bout d'un paquet doit être limité, autrement le paquet est inutile. Les applications qui ne sont pas en temps réel, comme le transfert de fichier ou le web, se focalisent quant à eux sur la fiabilité des communications.

De nos jours, en se connectant sur internet, l'utilisateur se trouve face à une multitude d'applications, de services proposés par le réseau. Ces services ne sont pas traités de la même façon au sein du réseau, car il existe des applications qui sont exigeantes et intransigeantes en termes de la QoS tel quel la voix sur IP, la vidéo conférence, le streaming. Par exemple certaines exigent un délai de transfert minimal et une garanti dans la livraison de paquets, alors que d'autres veulent du haut débit de manière constante, ou par burst, tout dépend de l'application. Par contre certains services sont moins exigeants, tel que le web ou le mail, bien que maintenant même ces services riches en pages multimédia, intègrent des photos HD et des vidéos, nécessitant aussi du débit. Donc nous pouvons dire que le contenu multimédia a investi toutes les applications disponibles sur un réseau informatique et donc nécessite une QoS selon différents paramètres (*figure 1.11*).

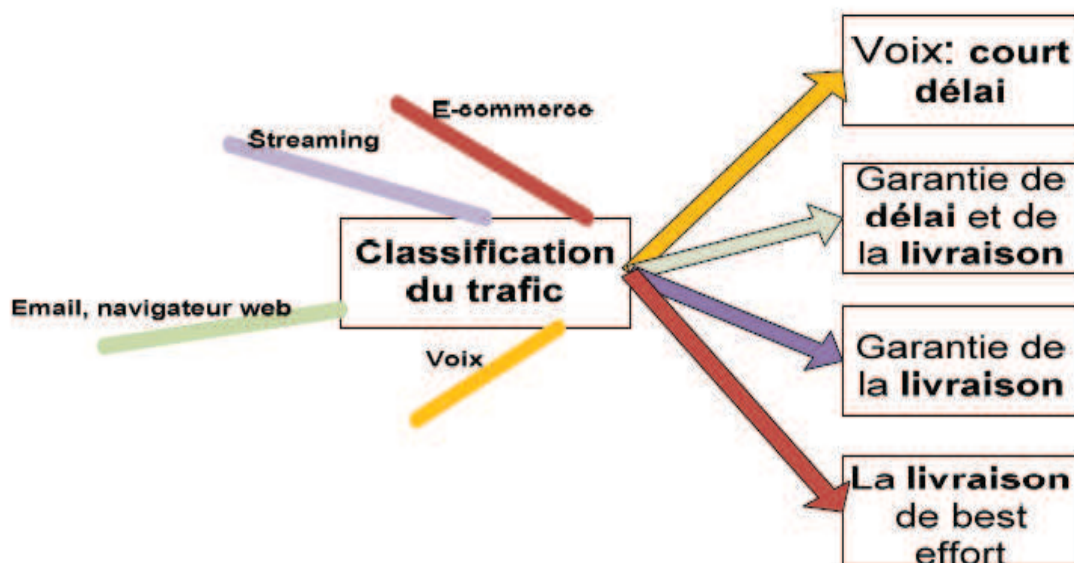


Figure 1.11. Classification des applications suivant leurs exigences en termes de QoS



Pour satisfaire, plus au moins, les exigences de ces applications dans le réseau wifi maillé, une différenciation de services au sein des routeurs maillés est nécessaire.

Le support de la QoS a été largement étudié dans les réseaux filaires. Le réseau ATM (Asynchronous Transfer Mode) supporte la QoS du trafic tout en le différenciant en plusieurs classes. Dans ce contexte, des solutions ont été proposées par l'IETF pour améliorer le réseau Internet afin de fournir la QoS aux communications multimédias. De même, des mécanismes ont été fournis pour gérer efficacement les ressources réseaux (bande passante, mémoires tampons) et répondre aux exigences des applications notamment celles ayant des contraintes temporelles.

Cependant, il est très difficile de garantir une QoS prédéterminée à une application temps réel dans un WMN, car il faut prendre en considération les spécificités de ces réseaux, à savoir: la bande passante limitée, le changement dynamique de la topologie dans le temps ainsi que le manque d'information complète sur l'état du réseau. En outre, la communication entre les stations mobiles, étant effectuée par voie radio, la qualité du lien sans fil reste peu fiable et sujette à des variations selon la configuration et l'état du réseau.

### **1.8. Conclusion**

Les réseaux maillés sans fil sont des solutions prometteuses pour un déploiement à faible coût, efficace et une plus grande couverture, elle permet à un utilisateur d'étendre rapidement la couverture spatiale de son réseau, et ainsi d'accéder aux différents services situés sur d'autres réseaux (Internet par exemple).

Un des facteurs clé qui a contribué de façon directe au déploiement des réseaux maillés en général, est le fait que le logiciel réseau et le matériel, étaient en quelque sorte déjà disponibles, sous la forme de logiciel et matériel ad hoc, qu'il faut adapter aux réseaux maillés. Le routage, qui représente une pierre angulaire pour le standard 802.11s, doit bénéficier d'une attention particulière lors de son adaptation et sa rénovation. En tenant compte des propriétés des réseaux maillés ou du wifi maillé étudié dans notre thèse, un routage efficace peut avoir un impact direct sur la qualité de services du réseau. Si en plus on combinait un protocole de routage efficace, avec quelques mécanismes de la sous couche MAC garantissant la QoS, les résultats seront encore plus intéressants. C'est ce qui définit l'objectif global de notre thèse.

## 2.1. Introduction

Les réseaux maillés sans fil (WMNs) attirent considérablement les attentions en raison de leurs diverses applications potentielles, telles que les réseaux à domicile à haut débit, les réseaux communautaires et de voisinage et les réseaux d'entreprise. De nombreuses villes et entreprises dans le monde ont déjà déployé ces réseaux maillés sans fil. Des forces militaires les utilisent pour connecter leurs ordinateurs (ordinateurs portables robustes), principalement dans les opérations sur le terrain. Pour ces applications, le réseau maillé sans fil peut permettre aux troupes de connaître l'emplacement et l'état de chaque soldat ou marin, et de coordonner leurs activités [11]. Les réseaux maillés sans fil sont également utilisés comme solution pour étendre la connectivité Internet pour les nœuds mobiles. Par exemple, dans le programme «un micro-portable par enfant » [12], les ordinateurs portables utilisent le réseau maillé sans fil pour permettre aux étudiants d'échanger des fichiers et de surfer sur Internet.

Pour assurer la QoS dans ces réseaux, plusieurs travaux dans la littérature ont proposé des solutions s'attaquant à des aspects différents, résumés dans les points suivants:

- Proposer des algorithmes pour améliorer la QoS au sein du réseau maillé.
- Combiner entre plusieurs algorithmes existants pour en faire un algorithme hybride plus robuste.
- Etendre des algorithmes existants pour en améliorer le fonctionnement.
- Toutes ces contributions sont validées, soit par des modèles mathématiques, soit par des simulations sous des environnements variés (NS2, NS3, OPNET, OMNET, etc.).

Les solutions proposées dans l'état de l'art, s'étalent sur les trois couches basses du modèle OSI, pour cela dans ce chapitre nous avons divisés notre état de l'art en trois parties. Dans la première partie, nous citons les solutions touchant la couche réseau en présentant les différentes approches de routage. Nous introduisons dans la deuxième partie les solutions orientées couche liaison de données en présentant les mécanismes d'amélioration de la QoS. Enfin, dans la dernière partie concernant la couche physique, nous analysons toutes les approches concernant le déploiement des routeurs à l'intérieure du réseau maillé, ainsi que l'aspect transmission. Une comparaison est ensuite menée par l'intermédiaire d'un tableau résumant les solutions apportées dans l'état de l'art.

## 2.2. Solutions orientées couche réseau

Un protocole de routage robuste et efficace peut avoir un impact très important sur la QoS. Les protocoles de routages utilisés dans les réseaux maillés sont les mêmes utilisés dans les réseaux ad hoc et MANET, et se divisent en trois catégories.

La première catégorie, nommée proactive, où le nœud maintient toutes les routes à chaque instant, en utilisant des messages de mises à jour périodiques. Nous citons la famille des protocoles DSDV [13], [14], [15] (Destination-Sequenced-Distance Vector), qui est bien adaptée pour l'auto configuration, et la famille OLSR [16], [18], [15] (Optimized Link State Routing).

La deuxième catégorie, nommée réactive, où la route est établie seulement au début de la communication, comme la famille AODV [17], [14], [15] (ad hoc On-demand Distance Vector), utilise les messages Route Request/ Route Reply (RREQ/RREP) pour la découverte des routes et un numéro de séquence pour chaque route établie. Quant à la famille DSR [18], [14], [15] (Dynamic Source Routing), basée aussi sur les messages RREQ/RREP, avec une petite variance, le RREQ garde les adresses des nœuds visités et maintient les informations du chemin établi entre la source jusqu'à la destination. Toutes ces informations sont stockées dans une table de routage.

La troisième catégorie, nommé hybride, combine les caractéristiques des deux premières catégories.

De nombreuses contributions sont présentées dans la littérature, parmi lesquelles nous citons celles qui nous ont le plus inspirés:

### 2.2.1. Comparaison et améliorations des protocoles de base existants

En premier lieu, les auteurs des références [12] [19] ont essayé de trouver le protocole de routage le plus adéquat pour les réseaux maillés, parmi ceux de base déjà cités AODV, DSR, OLSR et DSDV.

Ils ont comparé les quatre protocoles de routage en analysant deux topologies (fixe et mobile) sous l'environnement de simulation NS2. Les résultats obtenus de ces études, montrent que le protocole AODV est le meilleur en termes de délai, de débit, mais moins efficace au niveau des pertes de paquets et que le DSR est le plus mauvais vis-à-vis de la QoS.

En outre, ces auteurs se sont intéressés à l'impact des protocoles TCP et UDP sur la QoS. Leurs investigations confirment que le protocole UDP est plus adapté que le protocole TCP pour la gestion de la QoS.

Suite aux résultats énoncés par [12] et [19], certains chercheurs ont donc étendu le protocole AODV, afin d'améliorer ses performances. C'est ce qu'a entrepris l'auteur de la référence [20] en proposant un protocole R-AODV (Rate-AODV), utilisant un temps minimum de transmission comme métrique dans la recherche de la route optimale. Dans ce cadre, les nœuds ne sélectionnent que les liaisons à haut débit pour communiquer. Ses résultats de simulation indiquent que le R-AODV améliore le débit du réseau et réduit le délai de transmission, tout en surchargeant certains liens.

### **2.2.2. Routage basé sur un nombre minimal de sauts**

Pour certaines applications particulières, comme les opérations urgentes de sauvetage en cas de catastrophe naturelle, ou de lutte contre les incendies ou aussi des applications militaires comme un champ de bataille, c'est un fait que presque tous les protocoles de routage utilisés se basent sur le nombre minimal de sauts pour calculer le plus court chemin. Un des avantages de ce type de routage est qu'il permet en général des délais de transmission réduits.

Cependant certains inconvénients persistent comme la mauvaise répartition de la charge globale du réseau, entraînant la chute des nœuds, soit par manque d'énergie ou par congestions.

Les auteurs dans [21] ont formulé ce problème comme un problème d'optimisation du réseau, et ont présenté une PL (programmation linéaire) pour la modélisation et la formulation du problème. Les auteurs proposent un algorithme optimisé basé sur la connaissance des demandes de trafic.

Les algorithmes de routage provenant de ces formulations utilisent généralement des propriétés analytiques telles que l'utilisation optimale des ressources et de l'équité du débit. Les résultats de simulation démontrent que leur formulation du problème statistique pourrait intégrer efficacement l'incertitude de la demande de trafic dans l'optimisation de routage. Pour atteindre cet objectif, le problème de la congestion a été résolu.

### **2.2.3. Routage basé sur des estimations de la liaison et de la bande passante**

L'objectif de la proposition du protocole de routage dans [22] vise à établir un itinéraire entre la source et la destination en garantissant la latence (délai) de bout en bout. Le protocole est basé sur une estimation fiable de la qualité de liaison et de la bande passante disponible sur une route. L'algorithme proposé réduit également l'overhead de contrôle par l'envoi de messages de diffusion de petite taille.

En outre, le protocole utilise le relais multipoints (MPR) pour minimiser la surcharge due aux inondations des flux. Les principales contributions des auteurs sont les suivantes: (i) l'exploitation des avantages du MPR pour augmenter le débit du réseau en réduisant la surcharge de contrôle, (ii) le calcul de l'estimation de la qualité de la liaison, (iii) l'estimation fiable de la bande passante disponible.

### **2.2.4. Routage en sens inverse de la topologie**

A partir des clients maillés aux nœuds d'internet, l'itinéraire de l'information doit passer par une seule destination à travers la passerelle (Gateway) où il est sauvegardé. Cependant, sur le chemin inverse c'est-à-dire à partir du réseau Internet vers les nœuds clients, un itinéraire individuel pour chaque nœud est nécessaire.

Dans [23], les auteurs étudient ce cas de figure, à partir d'expériences de simulation avec des modèles réalistes via la mobilité des piétons et des voitures dans les villes. Ils comparent trois protocoles, dont chacun représente une famille de protocoles de routage: (i) un protocole de routage réactif l'AODV, (ii) un protocole de routage proactif nommé FBR (Field-Based Routing) (iii) et un protocole de routage source GSR (Gateway Source Routing). Les résultats obtenus indiquent que le FBR a le plus haut taux de paquets reçus, mais n'est pas extensible. L'AODV ne semble être ni évolutif ni disposant d'un taux faible de pertes de paquet. Un bon compromis est fourni par GSR, qui est le plus évolutif, avec un taux de pertes acceptable.

Ce travail confirme le point faible, cité dans le paragraphe 2.2.1, du protocole AODV, auquel vient s'ajouter la non évolutivité.

### **2.2.5. Routage basé sur la garantie de la bande passante**

Liu et al. [24] ont proposé un algorithme d'estimation de la bande passante disponible ainsi qu'un mécanisme de QoS basé sur une route de secours pour accueillir les flux de trafic multimédia dans les réseaux 802.11s mobiles. En outre, afin de valider le bon fonctionnement de leur algorithme, ces auteurs ont déployé leur proposition sur un campus d'essai des réseaux

maillés. Leur implémentation et les expériences qui ont suivies, montrent que les mécanismes proposés peuvent améliorer la stabilité du réseau, le débit et le taux de pertes de paquets de manière efficace, tout en réduisant le nombre des ruptures de route. Leur solution est basée sur le protocole DSR, avec un nouveau mécanisme dynamique de l'accusé de réception (ACK), utilisé pour équilibrer le débit et la qualité de la transmission. Les auteurs ont aussi introduit un mécanisme de codage multimédia dynamique au nœud source en fonction de la bande passante disponible.

### **2.2.6. Routage évitant les nœuds égoïstes**

Le débit d'un réseau maillé sans fil peut être fortement dégradé en raison de la présence de certains routeurs égoïstes, qui refusent de relayer les paquets pour d'autres nœuds.

Jaydip Sen [25] présente un algorithme pour la détection des nœuds égoïstes dans un réseau maillé. Il utilise la théorie de l'inférence statistique fiable pour la classification des nœuds en se basant sur des observations locales des nœuds. Les résultats de simulation montrent que l'algorithme a un taux de détection élevé tout en entraînant un faible taux d'overhead.

Par conséquent, cet algorithme améliore juste un paramètre de la QoS qui est le débit, tout en ignorant les autres critères primordiaux pour les applications multimédia.

### **2.2.7. Routage aléatoire**

Le contrôle de congestion est un domaine de recherche important dans le réseau maillé sans fil. Pour résoudre le contrôle de congestion dans ces réseaux, un algorithme de routage aléatoire, utilisant la notion de pondération de trajet, est présenté dans [26]. L'algorithme adopte un protocole à multi-passerelles pour résoudre le problème de congestion au niveau de ces passerelles. Les résultats des simulations montrent que le routage aléatoire est meilleur par rapport à l'AODV et DSR, car il a un temps d'attente moyen acceptable. L'algorithme peut effectivement résoudre le problème de la congestion, et rendre le réseau stable et efficace.

Cet algorithme exploite un routage aléatoire, souvent basé sur des méthodes probabilistes et des hypothèses qu'on suppose vraies pour un problème déterminé. Or dans le cas des WMNs, des valeurs réelles et des méthodes déterministes sont plus adéquates et conseillées.

### **2.2.8. Routage multicast pour des applications multimédias**

Un schéma de QoS pour des communications multicast multimédias dans les réseaux maillés sans fil est proposé dans la référence [27]. L'utilisation d'un nouveau système de calcul de la bande passante va fournir un contrôle d'admission adaptatif. L'algorithme s'appuie sur les informations qu'il reçoit du réseau et des couches applicatives pour calculer la consommation de la bande passante et fonctionne indépendamment de la couche MAC. En utilisant le schéma proposé de QoS, la couche réseau fournit des informations sur la congestion du réseau jusqu'à la couche applicative, en utilisant comme protocole de routage une extension d'AODV.

Les auteurs présentent des tests de validation pour assurer le fonctionnement correct de l'algorithme à l'aide d'une plate-forme réelle 802.11s. Les auteurs ont également effectué des tests de simulation pour évaluer les performances du système proposé. Les résultats de simulation montrent l'efficacité du système proposé vis-à-vis de la QoS.

### **2.2.9. Routage basé sur les clusters**

Le réseau maillé en général et le Wifi maillé en particulier ont un fonctionnement très proche des réseaux ad hoc et MANET. Une nouvelle approche basée sur le principe des protocoles en Clustering (groupes) a vu le jour, dont le principe est très simple: diviser le réseau en plusieurs sous réseaux, chaque sous réseaux a un nœud coordonateur dont le rôle est d'acheminer l'information entre ses différents coordonateurs voisins. Ce nœud est appelé chef de groupe (Cluster Head), les nœuds qui lui sont rattachés sont nommés membres ou clients. La communication dans les réseaux en Cluster est très simple, chaque membre qui veut émettre un paquet contacte directement le Cluster Head et ce dernier communique seulement avec les Clusters Head voisins, soit via une liaison directe ou en passant par une Gateway. Des travaux se sont focalisés sur ce type de routage dans les réseaux MANET. Mukesh Kumar [28] a comparé un protocole de routage en Clustering nommé CBRP (Cluster Based Routing Protocol) avec des protocoles basiques. Les résultats de simulation sont clairement en faveur du clustering en termes de délai et de bande passante. Cette nouvelle approche a été à la base de notre première contribution.

Pour démêler les avantages et inconvénients des différentes solutions présentées précédemment, un tableau récapitulatif (*Tableau 2.1*) est dressé afin de mettre en exergue les paramètres de QoS pris en compte par les solutions de l'état de l'art. Cette étude nous a



permis de mettre le point sur le meilleur algorithme de routage en termes de QoS à utiliser dans nos travaux de thèse.

Articles	Délai moyen	Over head	Perte de paquets	Débit	Commentaires
Zakrzewska et al. [12]	+	+	+	+	- Comparaison entre les protocoles de routages basiques.
Zhang et al. [20]	+	-	-	+	- Amélioration de l'AODV.
Kumar et al. [21]	-	-	-	+	- Programmation linéaire pour résoudre le problème du nombre de saut minimum.
Sen [22]	-	+	-	+	- Etablissement des routes en introduisant un overhead minimum pour améliorer le délai.
Baumann et al [23]	-	+	-	+	- Etablissement du chemin inverse dans les réseaux maillés
Liu et al [24]	-	-	-	+	- Estimation de la bande passante disponible avec un test grandeur nature
Sen [25]	-	-	+	-	- Detection des noeuds égoïstes - Approche en clustering
Chen et al [26]	+	-	-	-	- Routage aléatoire. - Utilisation des multi-passerelles
X. Wang et al [27]	-	-	+	-	- Utilisation d'une nouvelle métrique pour estimer la bande passante pour fournir un contrôle d'admission efficace
Mukesh Kumar [28]	+	+	+	+	- Comparaison entre CBRP et AODV, DSR, DSDV, OLSR

Tableau 2.1 : Résumé des approches au niveau de la couche réseau [41]

Dans ce tableau, les signes (+/-) signifient que l'article étudié a évalué son propre algorithme suivant le critère correspondant ou non.

Nous remarquons bien que la majorité des approches se contentent d'étudier au maximum deux critères de QoS. Ce qui confirme encore notre hypothèse stipulant l'absence d'un protocole de routage maîtrisant tous les paramètres de QoS en même temps, assurant au réseau le support des applications temps réel.

### 2.2.10. Synthèse

Suite à l'étude comparative précédente (*tableau 2.1*), nous pouvons conclure l'absence d'un protocole idéal jusqu'à maintenant pour les réseaux maillés sans fil. Cependant AODV et OLSR constituent le meilleur choix par rapport aux protocoles standards, avec un léger avantage pour l'AODV en termes de QoS. Une des solutions possibles et plausibles est de proposer une technique de routage hybride afin d'améliorer les performances du réseau. Notre étude de l'état de l'art, a montré que l'approche hybride et particulièrement l'approche en clustering a donné de très bons résultats en termes de QoS (*tableau2.1*). Donc naturellement, notre choix s'est fait sur l'utilisation de cette approche pour proposer une solution de routage efficace, robuste et garantissant la QoS.

## 2.3. Solutions orientées couche liaison de données

Les protocoles existants dans la couche liaison en générale et la sous-couche MAC en particulier sont très importants pour répondre aux exigences de qualité de services comme l'accès au canal, gestion de la file d'attente, code correcteur d'erreur, etc. En outre, les protocoles MAC doivent être interopérable avec les réseaux sans fil fonctionnant sur le même spectre et équitable envers tous les utilisateurs. Vue l'importance de cette couche, plusieurs approches se sont focalisées dessus pour améliorer la QoS au sein du réseau Wifi maillé. Les approches les plus récentes et les plus pertinentes sont étudiées et résumées dans ce qui suit.

### 2.3.1. Améliorations du CSMA/CA pour un gain en QoS

Les collisions entre les stations, et plus fréquemment les stations cachées mentionnées dans le premier chapitre, ainsi que l'accès au canal à cause du multi-saut, dégradent la qualité de service dans les réseaux maillés sans fil.

Mathilde Benveniste [29] propose d'utiliser des fenêtres de contention plus larges du Backoff pour réduire les risques de répétition des collisions entre les nœuds cachés. Il effectue aussi une extension spatiale du concept TXOP appelé «transport express» pour améliorer le protocole CSMA/CA conçu pour réduire le temps de latence connu de bout en bout par un maillage multi-sauts sans fil, en effaçant le flux multi-saut le plus tôt possible. Il propose également un nouveau mécanisme appelé «retransmission express» pour réduire les collisions au moment de la retransmission. Les résultats de simulation présentés dans [29] montrent l'intérêt potentiel des améliorations proposées et l'impact sur un réseau 802.11s mobile.

Dans cette approche, et d'après les résultats obtenus, une simple amélioration des valeurs du standard 802.11e (en particulier la valeur du TXOP) et du fonctionnement de la couche CSMA/CA peuvent assurer une QoS acceptable. Cette approche a été une source d'inspiration pour notre deuxième contribution.

### **2.3.2. Utilisation du TDMA à la place de CSMA/CA**

Une approche clé pour augmenter la capacité du réseau est d'équiper les routeurs sans fil avec des antennes intelligentes. Ces routeurs sont donc capables de se concentrer sur les transmissions spécifiques de leurs nœuds clients, tout en causant peu d'interférences à d'autres nœuds un peu plus éloignés.

Chin et al. [30] ont proposé un nouvel algorithme d'ordonnancement qui active des liens de manière à maximiser la capacité du réseau. Les auteurs ensuite vérifient l'algorithme proposé sur diverses topologies avec un accroissement du nombre de nœuds. Après de nombreuses simulations, les auteurs constatent que leur algorithme surpasse les algorithmes existants en termes de nombre de liens activés par emplacement, du temps de calcul, du nombre de saut et du délai de bout en bout.

### **2.3.3. Agrégation en temps réel pour des applications multimédia**

Navda et al. [31] ont conçu et évalué une architecture de réseau maillé sans fil qui peut transporter efficacement des flux vidéo provenant de plusieurs sources à un centre de télésurveillance. La qualité vidéo souffre d'une détérioration, de la présence de pertes sur le réseau par rafales en raison de paquets manquants ou du délai très important.

Grace à leurs expérimentations réelles, les auteurs ont mis à jour une allocation équitable pour les différentes sources vidéo.

Les routeurs sans fil dans le réseau maillé mettent en œuvre de nombreuses optimisations dans le but de réduire la variation du retard de bout en bout. Les auteurs améliorent la capacité du réseau par un algorithme du plus court chemin.

### **2.3.4. Gestion de flux multimédia sur une plateforme dédiée au 802.11s**

La contribution dans [32] est double. D'un côté, Riggio et al. proposent une méthodologie pour l'évaluation des applications multimédia sur des déploiements réels de WMNs. En second lieu, sur la base de la méthodologie définie, ils rapportent les résultats d'une vaste

campagne de mesures effectuées avec un banc d'essai de l'IEEE 802.11s, déployé dans un environnement de bureau.

L'objet de leur recherche s'est fait sur les trois flux principaux d'applications multimédias: VoIP, vidéoconférence et vidéo streaming. Deux singles-hop en forme d'étoile et une chaîne multi-saut comme topologies ont été exploitées afin de fournir une évaluation complète des performances du banc d'essai.

Cette contribution affirme que l'évaluation des réseaux 802.11s sur une plate-forme réelle est très concluante afin de mieux analyser et apporter un plus au réseau étudié.

### **2.3.5. Contrôle d'erreur du canal pour une application streaming sur le WMNs**

Moleme et al. [33] proposent un mécanisme à deux couches pour le transport vidéo en temps réel. Dans leur mécanisme, l'adaptation de vitesse est mise en œuvre dans la couche liaison pour le contrôle d'erreur du canal, la stabilité et la fiabilité du lien. En outre, la couche réseau est optimisée pour le contrôle de congestion et de sélection d'itinéraire optimal en utilisant des informations d'encombrement de la couche liaison. Le système proposé vise à améliorer la performance de l'UDP dans les applications de streaming en améliorant le débit, la perte de paquets et la latence.

Les auteurs dans ce travail ont essayé d'améliorer un protocole standard (UDP) pour assurer la qualité de service. Cependant leur solution n'a pas été généralisée pour analyser tous les scénarios possibles.

### **2.3.6. Amélioration du TDMA pour un gain de la QoS**

Cette solution améliore le TDMA en utilisant l'ordonnancement STDMA (Space-Time Division Multiple Access) au niveau de la couche MAC. Le STDMA est exécuté périodiquement dans l'ordonnanceur et peut s'adapter aux changements des demandes du trafic prioritaire. Cette technique exploite une planification centralisée. Pour améliorer d'avantage le TDMA, un contrôle d'admission est réalisé localement au niveau des nœuds Backbone sans fil, réduisant ainsi la signalisation.

Leoncini et al. [34] proposent deux politiques de distribution de bande passante liées au contrôle d'admission. En premier, les auteurs proposent une architecture en arbre, qui possède quatre types de nœuds: un réseau gestionnaire, des passerelles, des routeurs et des clients. Le gestionnaire de réseau, qui peut éventuellement coïncider avec l'une des portes d'entrée,

calcule périodiquement la transmission planifiée en fonction des besoins de bande passante. Ensuite, il diffuse à chaque passerelle le calendrier et la bande passante allouée à chaque nœud de l'arbre dont la racine. A son tour, chaque passerelle prend soin de fournir la transmission du calendrier et de l'allocation de bande passante à chaque routeur dans son arbre. En outre, dans la direction opposée, il recueille la bande passante exigée par les routeurs et la transmet au gestionnaire réseau.

### **2.3.7. Estimation de la bande passante et de la qualité du canal**

Un problème important dans les réseaux maillés sans fil, consiste à supporter les transmissions multimédia tout en garantissant la QoS aux utilisateurs mobiles. Pour la diffusion multimédia en temps réel, un débit instable ou une bande passante insuffisante entraînera des retards inattendus ou un problème de gigue. Ainsi, il reste difficile de fournir des garanties globales de services pour l'environnement maillé sans fil.

Chungui Liu et al [35] ciblent le problème de QoS multimédia dans les réseaux sans fil maillés. Les auteurs ont mis en place un réseau maillé sans fil du campus banc d'essai, et proposent un algorithme d'estimation de bande passante disponible ainsi qu'un mécanisme de route de secours pour accueillir les flux du trafic multimédia dans les réseaux maillés mobiles. Les expériences faites par les auteurs ont montré que leurs mécanismes peuvent améliorer efficacement la stabilité du réseau, le débit et le taux de pertes de paquets.

### **2.3.8. Optimisation**

Comme il a été cité auparavant, le transport vidéo sur les réseaux multi-sauts sans fil ont été largement étudiés récemment. Selon Dalei Wu et al. [36], la majorité des efforts de recherche dans ce domaine ont été réalisés en considérant l'approche de l'optimisation inter-couches. Toutefois, le contenu vidéo et de la qualité perçue par l'utilisateur ont été largement ignorées dans les travaux existants.

Ces auteurs intègrent l'analyse du contenu vidéo dans le transport vidéo sur des réseaux maillés sans fil (WMN). Une sensible optimisation inter-couches est proposée, pour obtenir la meilleure qualité vidéo de bout-en-bout, perçue par l'utilisateur. Le routage dans le réseau en plus de l'ordonnancement des paquets, ont été étudiés simultanément. Les auteurs visent l'optimisation des paramètres clés de chaque couche tout en se concentrant sur leurs interactions à travers la pile protocolaire du réseau global. Le travail proposé a été évalué par l'utilisation du codec H.264/AVC (codec de la vidéo) sur des simulateurs pour WMN. Les

résultats expérimentaux obtenus ont démontré que la solution proposée peut effectivement fournir une qualité vidéo satisfaisante pour l'utilisateur, surtout lorsque l'exigence du délai est stricte.

Le *Tableau 2.2* récapitule les différentes approches dédiées à la couche liaison de données. Il montre les paramètres de QoS pris en compte par les solutions de l'état de l'art précédent. Ceci, nous a permis de mettre le point sur les meilleurs mécanismes promulguant et apportant une certaine garantie de la QoS.

L'étude de cet état de l'art nous a permis de mettre à jour certains mécanismes forts intéressants pouvant améliorer les paramètres de QoS, en collaboration avec l'algorithme de routage qu'on a choisi d'étendre. Encore une fois, les expériences réelles dans les réseaux maillés sans fil, plus particulièrement le 802.11s, montrent les possibilités réelles de diverses solutions de l'état de l'art. Ce qui nous a aussi permis de faire notre choix en se basant sur des données expérimentales.

Articles	Délai moyen	Over head	Perte de paquets	Débit	Commentaires
Benveniste [29]	+	-	+	-	- Utilisation d'un CW plus large pour le Backoff - Retransmission légère pour éviter les collisions
Chin et al [30]	+	-	-	-	- Amélioration de TDMA et son utilisation à la place de CSMA/CA
Navda et al. [31]	-	+	+	+	- Evaluations des réseaux WMN pour un transport multimédia.
Riggio et al. [32]	+	-	+	+	- Une évaluation réelle du Wifi Mesh pour le transport du multimédia en temps réel.
Moleme et al [33]	+	-	-	+	- Optimisation d'un protocole de routage plus un contrôle d'admission
Leoncini et al [34]	-	+	-	+	- Amélioration du TDMA
Chungui Liu et al [35]	-	-	-	+	- Proposition d'un algorithme pour l'optimisation de la bande passante - Protocole de routage pour une route de secours.
Dalei Wu et [36]	-	-	-	-	- Intégration et analyse du contenu vidéo pour les réseaux 802.11s

Tableau 2.2 : Résumé des approches au niveau de la couche liaison [41]

### 2.3.9. Synthèse

La couche liaison est très importante pour fournir la qualité de service des réseaux maillés sans fil. Mais, plusieurs travaux de recherche sur ce sujet, se concentrent sur la résolution d'un problème, en oubliant les autres, qui pourtant sont étroitement liés. Certaines recherches portent sur les mécanismes d'allocation des ressources telles que CSMA/CA ou TDMA, d'autres étudient la gestion des files d'attente, en faisant un contrôle d'admission, ou encore l'utilisation de codes correcteurs d'erreurs par exemple [40], alors que tous ces aspects ont une influence directe sur la QoS. Par conséquent, trouver une solution optimale tenant compte de tous ces aspects reste une tâche très difficile à concrétiser. Après avoir étudié le standard 802.11e, nous avons remarqué aussi que le mécanisme TXOP, censé apporter de la QoS était



tout simplement inutilisé et oublié dans toutes les simulations faites par les auteurs et non implémenté par les constructeurs dans le matériel Wifi.

Ce qui nous a motivés pour l'introduire dans nos simulations et en voir l'impact sur la solution de routage que nous avons proposée.

## **2.4. Solutions orientées couche physique**

Les problèmes de la propagation des ondes radio dans un environnement encombré avec beaucoup d'obstacles, sont nombreux et connus. Les travaux sur ces problèmes ont beaucoup progressé et de nouvelles solutions sont régulièrement trouvées et proposées. Deux tendances ont été développées: la première touche à l'architecture (topologie en arbre, ou hiérarchique ou en clusters, etc.) et le déploiement (matériel utilisé, plus précisément l'utilisation d'antennes intelligentes et de passerelles) du réseau. L'état de l'art sur ce sujet propose beaucoup de solutions. Nous citons quelques une dans les paragraphes suivants car notre but ultime est plutôt de trouver une solution au niveau de la couche réseau, que nous avons enrichis par un mécanisme de niveau deux. Les solutions relatives au niveau un, vont surtout nous servir pour poser des conseils d'utilisation.

### **2.4.1. Codage de l'information et du canal et utilisation d'une architecture adéquate**

La transmission vidéo sur le canal sans fil multi-sauts doit surmonter la vulnérabilité inhérente aux vidéos compressées, qui sont les erreurs de transmission dues au canal. Pour prévenir efficacement la corruption des flux vidéo et la propagation des erreurs dans le domaine spatial et temporel, des contrôles d'erreur proactifs sont largement déployés. Une architecture nouvelle de transmission vidéo [37], basée sur le codec vidéo H.264, via les réseaux maillés sans fil, est proposée pour répondre à cette exigence.

### **2.4.2. Utilisation des antennes intelligentes pour augmenter le débit**

Le débit dans le réseau est principalement limité par deux facteurs: la congestion entrée/sortie de la passerelle et l'interférence causée par les transmissions simultanées. Une étude récente a montré que déployer plusieurs passerelles dans les réseaux maillés sans fil est un moyen efficace pour réduire le taux de congestion d'entrée/sortie. En outre, l'utilisation des canaux à interfaces radio multiples et de la technologie d'antennes directionnelles dans les réseaux maillés, peut atténuer fortement le problème d'interférence. Dans [38], les auteurs réalisent une pratique des réseaux maillés sans fil en utilisant l'architecture à multicanaux,

multi-radios et plusieurs antennes directionnelles. En plus, l'algorithme STDMA de programmation centralisée lien a été utilisé pour assurer le bon fonctionnement de la transmission. Ces approches sont illustrées par des exemples de simulation et les résultats obtenus montrent que leur algorithme possède de meilleures performances.

### **2.4.3. Optimisation du réseau grâce au bon emplacement des passerelles**

Xiaohua et al. [39] font l'étude du problème de la mise en place des passerelles pour la minimisation des coûts. Ils ont employé un ensemble de routeurs maillés, identiques en termes de portée. Le but de leur proposition est de sélectionner un ensemble de routeurs maillé comme des passerelles pour remplacer ceux qui passent en mode repos avec un coût global minimum. Aucun algorithme distribué disposant d'un facteur d'approximation constant n'avait été proposé avant ces auteurs. Leur algorithme améliore nettement le coût et l'efficacité du réseau.

### **2.4.4. Utilisation de passerelles multiples**

Etant donné que la bande passante du lien est fixe et partagée par tous les clients, si leur nombre croît, cela va provoquer une dégradation du débit du client, et par conséquent une dégradation des performances globales du réseau. Les réseaux maillés sans fil étant dynamiques, auto-organisés et peuvent s'auto dépanner, cela impose une responsabilité encore plus grande sur les passerelles. Avoir plusieurs passerelles dans le réseau maillé peut améliorer les performances du réseau d'une manière significative. C'est ce que préconisent les auteurs dans [40] et le démontrent par des simulations.

Comme nous l'avons fait précédemment, les travaux de recherche, non exhaustifs relatifs à la couche physique, sont résumés dans le tableau récapitulatif (*Tableau 2.3*). Cette étude comparative nous permet de déduire et donc de conseiller les moyens physiques nécessaires pour garantir la QoS.

Articles	Délai moyen	Over head	Perte de paquets	Débit	Commentaires
Fan et al [36]	+	-	-	-	- Nouvelle transmission vidéo et un codage vidéo sont proposés.
Zhao et al [37]	+	-	-	+	- Proposition d'une architecture optimale nécessaire pour le bon déploiement du réseau
XiaoHua et al [38]	-	-	-	-	- Evaluations de plusieurs topologies (arbre, hiérarchique, et clusters) pour le transport multimédia sur le WMNs.
Geeta et al [39]	-	-	-	-	- Le choix de la passerelle la plus proche pour augmenter la capacité du réseau.

Tableau 2.3 : Résumé des approches au niveau de la couche physique [41]

#### 2.4.5. Synthèse

Suite à une synthèse des travaux de recherche mentionnés dans l'état de l'art précédent, nous déduisons que les solutions déployées dans la couche physique, portent généralement sur [42]:

- L'utilisation d'antennes intelligentes.
- Utilisation de plusieurs passerelles au lieu d'une seule, pour équilibrer la charge du réseau.
- L'utilisation de nouvelles méthodes d'encodage, l'utilisation de MIMO (Multiple Input Multiple Output) et l'utilisation d'une fréquence différente par les stations mobiles, pour améliorer le taux d'interférence et le débit de transmission des WMNs.

### 2.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons résumés les solutions de l'état de l'art aux nombreux défis posés dans la garantie de la qualité de service pour les réseaux maillés sans fil (WMNs) en général.

Nous avons divisés notre état de l'art en trois parties, où dans chaque partie nous avons développé les solutions et les approches existantes dans la littérature dans les trois couches basses de la pile protocolaire OSI.

Nous sommes arrivés à la conclusion que, si nous voulons optimiser les ressources du réseau maillé pour assurer la QoS, le moyen le plus efficace est de combiner les solutions les plus efficaces au niveau des trois couches, étant donné que le réseau maillé ne couvre que les trois couches basses du modèle OSI.

Pour le routage, nous pensons que l'approche du Clustering est la plus intéressante vu ses performances et sa souplesse, ce qui a fait l'objet de notre première contribution.

En ce qui concerne les solutions de la couche liaison, changer complètement le protocole CSMA/CA du standard IEEE 802.11s n'est pas très indiqué, car c'est toucher à une solution qui fonctionne bien jusque là, et en plus les résultats obtenus ne sont guère convainquant. D'un autre côté, il existe diverses solutions pour améliorer la qualité de service, sans toucher au protocole du standard, comme la gestion de file d'attente, le contrôle d'erreur, de flux et d'admission, l'estimation de la bande passante, etc. Dans ce cadre, notre deuxième contribution, consiste à adapter les paramètres de contention proposés par le standard 802.11e à notre réseau maillé pour en tirer partie au maximum, en plus de l'utilisation effective du paramètre TXOP.

Par ailleurs, du côté transmission, l'utilisation de la technique MIMO, déjà incluse dans certains AP vendus sur le marché, augmente le débit d'une manière significative. Aussi l'utilisation d'antennes intelligentes constitue une bonne option pour limiter les interférences. Egalement, la détection/correction d'erreurs d'un canal très fortement perturbé est la solution idéale pour éviter les nombreuses retransmissions qui usent les ressources du réseau [41] [42].

### **3.1. Introduction**

Le problème de routage est apparu depuis fort longtemps, avec l'apparition des réseaux filaires étendus, où plusieurs solutions ont été apportées, standardisées et adoptées. Le contexte des réseaux sans fil, a exigé la rénovation de ces solutions pour s'adapter aux contraintes de ce type de réseau. En plus, l'apparition de réseaux émergents comme les réseaux maillés, apporte avec elle son lot de changements, en termes de contraintes, de topologie et d'architecture, ce qui nécessite de nouvelles solutions. Cela constitue l'objet de notre première contribution.

Dans ce chapitre nous allons donner le détail de notre proposition, qui consiste en un algorithme de routage présent dans l'état de l'art qu'on a étendu pour en améliorer les performances de QoS. Pour cela, nous allons d'abord présenter les protocoles de routage utilisés dans le standard 802.11s, ensuite nous allons introduire le protocole de routage sur lequel on s'est basé dans notre thèse et à la fin comparer ce dernier avec le meilleur protocole existant parmi les protocoles de base afin de voir le gain en QoS pour des flux multimédia [43].

### **3.2. Problématiques et contraintes de routage dans le réseau Wifi maillé**

Contrairement aux réseaux filaires classiques où les nœuds sont fixes ce qui donne une certaine stabilité des routes, la mobilité fréquente des nœuds sans fil et la nature des liens sans fil, impliquent une constante, modification de topologie, disparition de routes, et l'apparition de nouvelles routes. L'absence d'une infrastructure chargée du routage augmente sa complexité. Ce qui change complètement l'approche du routage par rapport aux approches classiques. D'où la nécessité de trouver des protocoles de routage plus performants pour s'adapter à cet environnement. Ces protocoles exigent des ressources importantes: mémoires, processeurs, bande passante et énergie, mais ces ressources sont rares dans les réseaux sans fil, vu ces caractéristiques contraignantes, ce qui complique la conception de ces protocoles. En plus, le fait que les nœuds peuvent relayer des paquets, cela nécessite l'utilisation d'algorithmes de routage distribués.

Le réseau 802.11s a une architecture particulière (routeurs et clients), les routeurs forment l'épine dorsale du réseau, régulièrement alimentée et fixe en général, donc elle n'a pas de problème d'énergie ni de mobilité. Par contre au niveau des clients maillés, la mobilité varie selon l'utilisateur, et l'énergie dépend du terminal utilisé. Donc principalement la

problématique et l'objectif du routage dans le 802.11s, c'est de prendre en charge une forte mobilité des clients, des liens de mauvaise qualité, promouvoir l'économie d'énergie, tout en garantissant la QoS d'une manière intelligente pour satisfaire les exigences des différentes applications temps réel des utilisateurs [43] [44].

### 3.3. Classification des protocoles de routage

Lors de la transmission d'un paquet d'une source vers une destination, il est nécessaire de faire appel à un protocole de routage pour acheminer correctement le paquet par le chemin le plus optimal. Plusieurs protocoles ont été proposés dans les réseaux ad hoc en général et d'autres réseaux en particulier ayant le même mode de fonctionnement que notre réseau [43] [44].

Le principal but de toute stratégie de routage est de mettre en œuvre une bonne gestion d'acheminement qui soit robuste et efficace. D'une manière générale, toute stratégie de routage repose sur des méthodes et des mécanismes pouvant être regroupés en trois grandes classes: les protocoles de routage proactifs, les protocoles de routage réactifs et les protocoles de routage hybrides (*Figure 3.1*).

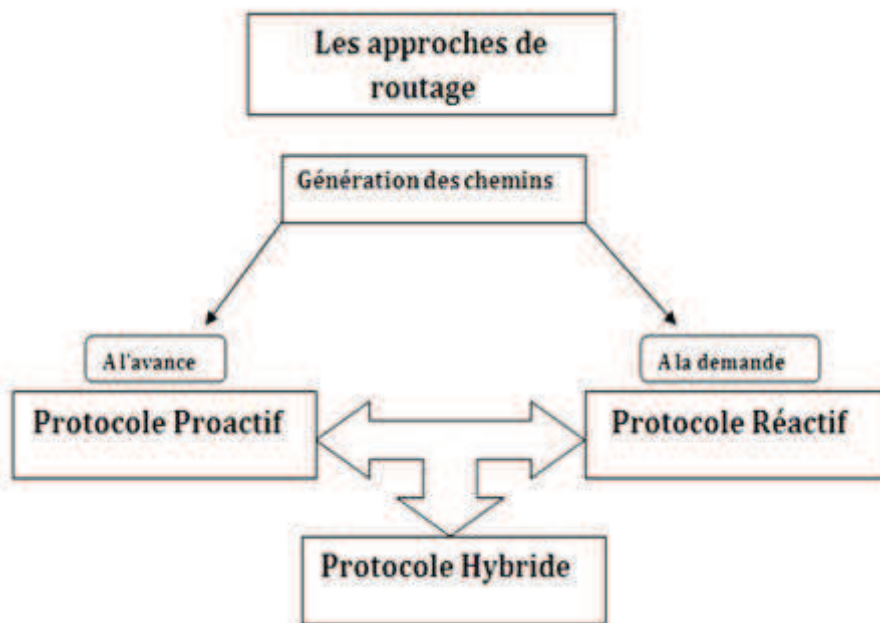


Figure 3.1 Classification des protocoles de routage

### 3.3.1. Les protocoles de routage proactifs

Le principe de cette classe [44], [45], [46] repose sur des routes préétablies à l'avance. Les protocoles de routage proactifs utilisent une ou plusieurs tables de routage dans chaque nœud. Ils essaient de maintenir les meilleurs chemins existants vers toutes les destinations possibles au niveau de chaque nœud du réseau. Pour se faire, ils utilisent l'échange régulier des messages de contrôle pour mettre à jour les tables de routages vers toute destination. Cette approche permet de disposer d'une route vers chaque destination instantanément, au moment où un paquet a besoin d'être routé. Les tables de routage sont modifiées à chaque changement de la topologie du réseau. Cette approche offre un gain de temps lorsqu'une route est demandée, mais elle est coûteuse en termes de bande passante à cause de l'émission régulière des messages de contrôle surtout dans les réseaux à grande échelle. Les protocoles proactifs les plus utilisés sont DSDV, OLSR, FSR (Fisheye State Routing), LSR (Link State Routing protocol), GSR (Global State Routing), ZHLS (Zone-based Hierarchical Link State). Dans ce chapitre nous allons détailler les protocoles OLSR et DSDV, qui font partie des algorithmes de routage préconisés par le standard 802.11s.

#### 3.3.1.1. Protocole OLSR (*Optimized Link State Routing*)

OLSR [16] est un protocole de routage proactif à état de liens. Son innovation réside dans sa façon à économiser la consommation de la bande passante lors des diffusions (broadcast). Ceci est réalisé grâce à l'utilisation du concept des "relais multipoints" (*MPRs*) dans lequel chaque nœud choisit un sous-ensemble de ses voisins pour retransmettre ses paquets en cas de broadcast.

En se basant sur le broadcast en utilisant les MPRs, tous les nœuds du réseau sont atteints avec un nombre réduit de répétitions. Un ensemble de MPRs d'un nœud  $N$  est l'ensemble minimal de ses premiers sauts voisins qui couvrent (dans le sens de la portée de communication) ses deuxièmes sauts voisins.

Dans OLSR, chaque nœud diffuse périodiquement des messages Hello qui contiennent l'état de ses liens avec ses premiers sauts voisins (unidirectionnel, bidirectionnel ou MPR pour dire que ce voisin est un MPR). Grâce aux messages Hello, un nœud construit sa table des voisins ainsi que la liste des voisins qui l'ont choisi comme MPR dits "MPR-sélecteurs". De plus, un nœud diffuse périodiquement des messages TC (*Topology Control*) contenant la liste de ses MPR-sélecteurs. En exploitant ces messages, chaque nœud remplit les deux champs nommés "destination" (correspond aux MPR-sélecteurs dans le message TC) et "dernier saut" (prend

comme valeur l'identificateur du nœud émetteur du message TC) d'une table dite de topologie. Les tables de topologie et des voisins sont exploitées pour construire la table de routage.

Il faut noter que le protocole OLSR est bien adapté à un réseau haute densité. Dans un réseau à faible densité, chaque voisin devient MPR et OLSR se réduit à un protocole à état de liens pur.

### **3.3.1.2. Protocole DSDV (Destination Sequenced Distance Vector)**

Dans son fonctionnement de base, le protocole DSDV [13] partage la même philosophie que les algorithmes à vecteur de distances. La contribution principale du protocole DSDV est l'utilisation des numéros de séquence qui permettent d'éviter la formation des boucles de routage.

Quand un nœud reçoit plusieurs paquets de mise à jour au sujet d'un même nœud destination, il choisit celui avec le numéro de séquence le plus haut. Le numéro de séquence est utilisé afin d'éviter le problème des boucles infinies et des transmissions inutiles des messages sur le réseau. Il permet en plus de maintenir la consistance des informations de routage. A cause de la mobilité des nœuds dans le réseau sans fil mobile, les routes changent fréquemment, ce qui fait que les routes maintenues par certains nœuds, deviennent invalides. Les numéros de séquence permettent d'utiliser les routes les plus nouvelles (les plus fraîches (fresh routes)). Un nœud qui détecte la rupture d'un lien, génère un paquet de mise à jour dont le numéro de séquence possède une valeur infini. En recevant ce paquet, chaque nœud retire l'entrée correspondante de sa table de routage. Pour assurer la consistance des tables de routage, les mises à jour de ces derniers s'effectuent périodiquement et immédiatement après un changement de topologie. Pour réduire la quantité du trafic que génèrent ces mises à jour, deux types de paquets sont utilisés. Le premier, appelé " *full dump* ", contient toutes les informations de routage. Dans le cas d'une mobilité réduite, des paquets plus petits dits "*incremental*" sont utilisés; ils contiennent juste les informations de routage ayant changées depuis la dernière mise à jour complète. Une autre solution pour réduire le trafic dans le réseau est que les nœuds reportent les mises à jour par un laps de temps qui vaut le temps moyen nécessaire à la découverte du chemin le plus court vers une destination donnée.

### **3.3.2. Les protocoles de routage réactifs**

Le principe de cette classe [44], [45], [46] est que les routes sont établies à la demande. Ces protocoles se basent sur la découverte et le maintien des routes. Suite à un besoin, une



procédure de découverte globale de route est lancée, ce processus s'arrête une fois la route trouvée ou toutes les possibilités sont examinées. Dès que la communication est établie, cette route est maintenue jusqu'à ce que la destination devienne inaccessible ou jusqu'à ce que la route ne soit plus désirée. Ce type de routage minimise l'échange des messages de contrôle, ce qui libère la bande passante, cependant il est lent à cause de la recherche des chemins, ce qui peut dégrader les performances des applications interactives. Parmi les protocoles basés sur ce principe, nous citons DSR, AODV, TORA (Temporally Ordered Routing Algorithm), EARP (Energy Aware Routing Protocol), CEDAR (Core Extraction Distributed for Adhoc Routing algorithm), SSR (Signal Stability Routing), LAR (Location Aided Routing protocol). Nous nous sommes intéressés dans notre étude à DSR et à AODV à cause de leurs hautes performances.

#### **3.3.2.1. Protocole AODV (*Ad hoc On Demand Distance Vector*)**

Le protocole de routage AODV [17], tout comme DSR, repose sur le mécanisme de découverte de chemins à la demande mais il n'utilise pas le routage source. Il repose sur le routage saut par saut. Chaque nœud dans AODV, maintient une table de routage et utilise les numéros de séquence comme DSDV pour éviter le problème des boucles de routage.

A la réception d'un paquet RREQ, le nœud destination répond en envoyant un paquet RREP vers le nœud source. Un nœud intermédiaire peut également répondre au paquet RREQ s'il possède un chemin valide vers la destination en question, sinon il incrémente le compteur des sauts du paquet RREQ et garde la trace de ce dernier et il le rediffuse ensuite à ses voisins.

Chaque nœud maintient aussi l'adresse du voisin qui lui a transmis le paquet RREQ, pour pouvoir acheminer ultérieurement le paquet RREP. En recevant un paquet RREP, chaque nœud enregistre l'adresse du nœud qui lui a envoyé le paquet RREP pour qu'il puisse acheminer après les paquets de données, et il le retransmet.

La maintenance des chemins dans AODV est basée sur l'échange périodique de messages «Hello». Un nœud qui ne reçoit pas de messages «Hello» d'un voisin pendant une période de temps donnée, considère que la liaison avec ce voisin est rompue. Dans ce cas, il envoie un paquet RERR à tous ses voisins actifs pour invalider tous les chemins qui utilisent le lien brisé. Ces nœuds à leur tour renvoient le même paquet à leurs voisins jusqu'à ce que tous les nœuds sources actifs soient prévenus de la rupture. Dès la réception de ce paquet, le nœud source ré-initie une nouvelle découverte de chemins.

### **3.3.2.2. Protocole DSR (Dynamic Source Routing)**

DSR [18] est un protocole de routage source. Il est composé de deux mécanismes: la découverte des chemins et la maintenance des chemins. Un nœud qui veut transmettre des données vers une destination, ne maintient aucun chemin vers cette dernière dans sa mémoire. Il initie une découverte de chemins en diffusant un paquet RREQ vers tous ces voisins. Un nœud intermédiaire qui reçoit ce paquet peut répondre de son cache, s'il connaît un chemin vers la destination, sinon il insère son adresse dans le paquet et le rediffuse.

Le nœud qui répond au paquet RREQ, s'il est la destination, génère un paquet RREP et il inclut dans ce dernier la séquence des nœuds enregistrés dans le RREQ. Sinon, il effectue une concaténation de la séquence des nœuds incluse dans le RREQ avec le chemin enregistré dans son cache. Si le nœud générant le RREP maintient un chemin vers la source, il envoie le RREP sur ce chemin. Un nœud qui ne maintient pas un chemin pareil, transmet le RREP en suivant le chemin inverse de celui dans le RREP si les liens sont bidirectionnels. Sinon une nouvelle découverte de chemins est initiée en incluant la réponse dans un paquet RREQ.

Un nœud qui transmet un paquet en utilisant un chemin source est responsable de confirmer la bonne réception de ce dernier. Le paquet est retransmis jusqu'à la réception d'une confirmation ou jusqu'à ce que le nombre maximal de retransmission soit atteint. Si les tentatives de retransmission échouent ou le nombre maximal de retransmissions est atteint, un paquet RERR sera transmis vers le nœud source identifiant le lien brisé. En recevant ce paquet, le nœud source retire de son cache les entrées qui contiennent ce lien. Si aucun chemin alternatif n'est disponible, il ré-initie une nouvelle découverte de chemins.

### **3.3.3. Protocoles de routage Hybride et en clustering**

Cette classe [44], [45], [46] combine les deux concepts, proactif et réactif, afin de profiter de leurs avantages, et limiter leurs inconvénients. Le principe est que chaque nœud utilise un protocole de routage proactif localement (2 à 3 sauts en général), et un protocole de routage réactif en extérieur. Il existe plusieurs protocoles de routage en Clustering utilisés dans les réseaux de capteurs ou ad hoc, nous citons à titre d'exemples:

#### **3.3.3.1. Protocole de routage HWMP (Hybrid Wireless Mesh Protocol)**

Le protocole HWMP [47] [48] est un protocole de routage développé pour les réseaux maillés. Il combine les approches proactives à base d'arbre et réactives. HWMP utilise un ensemble de primitive et de traitements acquis du protocole AODV. Ces primitives sont

utilisées pour installer un arbre à vecteur de distance pour un routage vers la racine (l'émetteur). Il supporte deux modes opératoires en fonction de la configuration.

- Mode réactif : dans ce mode, les nœuds créent et maintiennent les routes selon le besoin. Lorsqu'un nœud a besoin d'une route qui n'existe pas dans sa table de routage, une procédure de découverte globale de routes est lancée.
- Mode proactif : dans ce mode, lorsqu'un nœud du réseau souhaite communiquer avec un autre nœud, il peut localement interroger la table de routage dont il dispose. Le routage peut ainsi s'effectuer de proche en proche.

#### **3.3.3.2. LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) [52]**

Il est l'un des algorithmes de routage hiérarchique le plus populaire pour les réseaux de capteurs. L'idée est de former des clusters de nœuds de capteurs basés sur les zones où il y a un fort signal reçu, puis utiliser des Clusters-Heads locaux comme passerelle pour atteindre la destination. Cela permet d'économiser de l'énergie car les transmissions ne sont effectuées que par les Cluster-Head plutôt que par tous les nœuds de capteurs.

#### **3.3.3.3. PEGASIS (Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems) [53]**

C'est une version améliorée du protocole LEACH. PEGASIS forme des chaînes plutôt que des clusters de nœuds de capteurs afin que chaque nœud transmette et reçoive uniquement des données d'un voisin. Un seul nœud est sélectionné à partir de cette chaîne pour transmettre à la station de base. L'idée de PEGASIS est d'utiliser tous les nœuds pour transmettre ou recevoir des données avec ses plus proches voisins. Il déplace les données reçues de nœud à nœud, puis les données seront agrégées jusqu'à ce qu'elles atteignent tous la station de base. Donc, chaque nœud du réseau est tour à tour un chef de file de la chaîne, ainsi que responsable pour transmettre l'ensemble des données recueillies et fusionnées par la chaîne de nœuds au niveau de la station de base.

#### **3.3.3.4. HEED (Hybrid Energy-Efficient Distributed clustering) [54]**

C'est un algorithme distribué de clusterisation proposé pour les réseaux de capteurs. HEED construit des Cluster-Heads connectés à plusieurs sauts. Les clusters formés sont disjoints. Les Cluster-Heads sont élus en se basant sur l'énergie résiduelle de chaque nœud. Les nœuds ayant une haute énergie résiduelle deviennent Cluster-Heads. Cet algorithme invoque aussi

une métrique secondaire utilisée pour rompre l'égalité. Le cas d'égalité dans ce contexte inclut le cas quand un nœud se trouve à proximité de deux Cluster-Heads et quand deux Cluster-Heads se trouvent dans le même rayon. Cette métrique est une métrique de coût de communication qui peut être fonction de la proximité des voisins ou de la densité du cluster.

**3.3.3.5. TEEN (Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol) et APTEEN (Adaptive Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol) [55-56]**

Ces protocoles conviennent pour les applications critiques. Dans les deux protocoles, le facteur clé est la valeur de l'attribut mesuré. La caractéristique supplémentaire d'APTEEN est la capacité de changer la périodicité et les paramètres de TEEN en fonction des besoins des utilisateurs et des applications.

TEEN est conçu pour être sensible à des changements soudains des attributs tels que la température. La réactivité est importante pour les applications critiques dont le réseau fonctionne en mode réactif. L'architecture du réseau de capteurs est basée sur un groupement hiérarchique où les nœuds forment des clusters et ce processus va se répéter jusqu'à ce que la station de base soit atteinte.

APTEEN est une extension de TEEN qui fait à la fois la collection des captures périodique de données et qui réagit aux événements critiques. Quand la station de base forme des clusters, les Clusters-Head diffusent les attributs, les valeurs des seuils, ainsi que le calendrier de transmission à tous les nœuds. Le Cluster-Head effectue également l'agrégation de données afin d'économiser l'énergie.

**3.3.3.6. CBRP (Cluster Based Routing Protocol).**

Ce dernier étant très répandu dans les réseaux MANET [28] [49], notre choix s'est naturellement porté sur lui, vu ses nombreux avantages par rapport aux autres protocoles, comme le montre le tableau comparatif suivant (*Tableau 3.1*) . Son fonctionnement est détaillé dans le paragraphe suivant.

Nom du protocole	Efficacité énergétique	Stabilité du cluster	Scalabilité	Délai	Equilibrage du réseau	Complexité du protocole
LEACH	Très faible	Moyen	Très faible	Très petit	Moyen	Faible
PEGASIS	Faible	Faible	Très faible	Très grand	Moyen	Elevé
HEED	Moyen	Elevée	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen
TEEN	Très élevé	Elevée	Faible	Petit	bon	Elevé
CBRP	Faible	Bon	Moyen	Très petit	Très bon	Très faible

Tableau 3.1 : Comparaison entre les différents protocoles de routage en clustering

### 3.4. Motivations

Suite aux constatations de notre état de l'art et nos analyses du chapitre précédent, nous pouvons conclure que les protocoles AODV et OLSR sont les meilleurs en termes de QoS dans les réseaux maillés en général, mais ils ont des problèmes de passage à l'échelle. Egalement, les réseaux à base de clusters, initialement destinés aux réseaux de capteurs pour pallier leurs problèmes d'énergie et de capacité de stockage, peuvent s'avérer intéressants pour le réseau maillé, comme l'ont démontré tous les travaux de recherches cités précédemment (Tableau 3.1) [50] [51]. Ils ont confirmé que les protocoles en Clustering apportent un gain estimable en termes de QoS par rapport aux protocoles de routage classiques.

### 3.5. Le protocole de routage CBRP

Dans le Protocole de Routage Basé sur les Clusters CBRP (Cluster Based Routing Protocol) [57] [58] [59], l'ensemble des nœuds du réseau est décomposé en groupes. Le principe de formation des groupes est le suivant. Un nœud  $n_l$  qui n'a pas de statut (i.e. qui n'est ni membre ni représentant (chef) de groupe), active un Timer et diffuse un message "Hello". Lorsqu'un représentant de groupe reçoit le message "Hello", il envoie immédiatement une réponse à l'émetteur. Lors de la réception de la réponse, le nœud  $n_l$  change son état "indécis" à l'état "membre". Si  $n_l$  dépasse un certain timeout en attendant la réponse, et dans le cas où il possède un lien bidirectionnel vers au moins un nœud voisin, il se considère lui-même comme représentant de groupe. Dans le cas contraire,  $n_l$  reste dans l'état indécis et il répète la même procédure. A cause des changements rapides de la topologie des réseaux ad hoc, l'attente des nœuds indécis est très courte.

Afin de sauvegarder la répartition des nœuds dans les groupes, chaque nœud maintient une table appelé *table des membres*. Chaque entrée de cette table est associée à un voisin. Elle indique l'état du lien (uni ou bidirectionnel) et le statut du voisin (membre, représentant de groupe, passerelle), tel qu'il est mentionné dans la *figure 3.2*.

ID du Cluster	Statut	Etat du lien
---------------	--------	--------------

Figure 3.2: Table des membres

Un chef de groupe, nommé Cluster Head (CH), maintient dans sa table de routage les informations des membres qui appartiennent à son groupe uniquement, et aussi les identificateurs des passerelles et des clusters Head voisins, pour les utiliser au moment du routage de données (*Figure 3.3*).

ID des clusters Head voisins	ID des passerelles voisines	ID des membres
------------------------------	-----------------------------	----------------

Figure 3.3: Table des chefs de groupe (Cluster Head)

Si la distance entre deux Cluster Head voisins reste importante, ses derniers peuvent communiquer via une passerelle (Gateway) jouant le rôle de relais. En gardant la philosophie du routage à base de tables de routage, même la passerelle a sa propre table qui se compose des identificateurs des Clusters Head qui sont en communication directe avec elle, et la liste des membres de chaque CH qu'elle relie (*Figure 3.4*).

ID des clusters Head voisins	ID des Membres
------------------------------	----------------

Figure 3.4: Table de la passerelle (Gateway)

Le routage dans le protocole CBRP se fait de la manière suivante: quand un nœud source veut envoyer des données à un nœud destination, il diffuse par inondation une requête de demande de chemin, et cela uniquement aux représentants des groupes voisins (CH). Un représentant de groupe qui reçoit la requête, vérifie en utilisant sa table de routage, l'existence du nœud destination dans son groupe. Si la destination existe, le représentant y envoie directement la requête, dans le cas contraire, la requête est diffusée aux représentants des groupes voisins. L'adresse des représentants des groupes ayant déjà vu la requête, insère leur identité dans la requête de demande de chemin, un représentant de groupe ignore toute requête déjà traitée. Quand la destination reçoit le paquet contenant la requête, elle répond par l'envoi du chemin qui a été sauvegardé dans le paquet de la requête. Dans le cas où le nœud source ne reçoit pas

de réponse après expiration d'une certaine période, il envoie de nouveau une requête de demande de chemin.

Lors de l'acheminement des données, si un nœud détecte qu'un lien est défaillant, il fait retourner un message d'erreur à la source et applique un mécanisme de réparation locale. Dans ce mécanisme, si un nœud  $n1$  trouve qu'un nœud suivant  $n2$  ne peut pas être atteint, il essaie de vérifier si le nœud  $n2$  ou le nœud qui vient après, peuvent être atteints à travers un autre nœud voisin. Si l'un des deux cas est vérifié, les données sont envoyées en utilisant le chemin réparé.

Comme le réseau Wifi maillé a pour caractéristiques des routeurs maillés statiques et que ses derniers sont alimentés, donc il est évident que l'utilisation des routeurs maillés comme Cluster Head serait très avantageuse.

La mobilité des clients pose beaucoup de problèmes dans les réseaux sans fil en général et la QoS se dégrade proportionnellement. Dans notre cas, nous avons assimilé les clients maillés aux membres dans l'architecture CBRP. Quant aux passerelles, elles peuvent être soit des routeurs maillés ou des clients plus au moins statiques (*figure 3.5*).

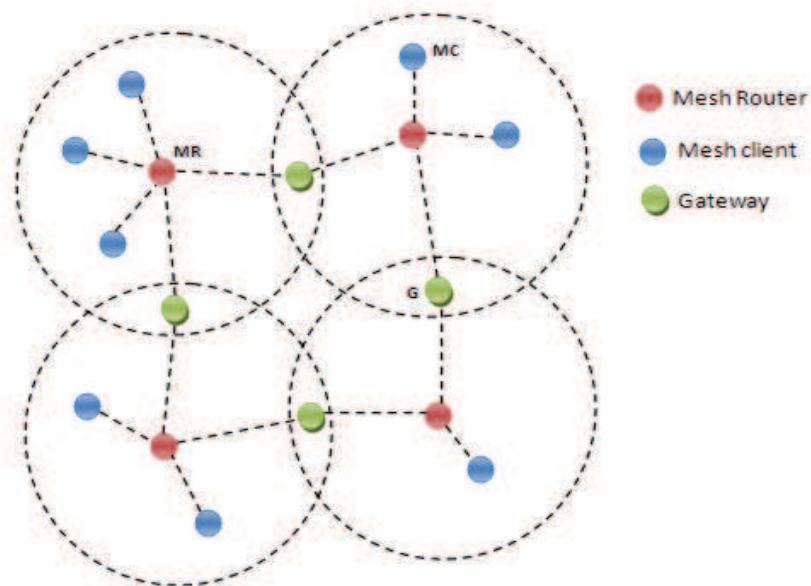


Figure 3.5: Correspondance entre le protocole CBRP et le standard 802.11s



### 3.6. Première contribution: le protocole CBRP étendu à la QoS (Q-CBRP)

Dans notre première contribution [60], [61], nous avons utilisé le protocole CBRP, qui comme nous l'avons déjà signalé, est un protocole performant, mais possédant néanmoins quelques manques, que nous avons voulu combler par des ajouts. Les performances supplémentaires dues à notre extension, ont été validées par une implémentation et une simulation sous NS2. Dans les paragraphes suivants, nous allons présenter nos extensions du protocole CBRP et les résultats de simulations qui attesteront les performances de notre approche.

Nos améliorations sont résumées en deux points: nous avons modifié dans un premier temps le paquet de routage du protocole utilisé et un deuxième ajout a été opéré au niveau des tables de routage. La *figure 3.6* illustre l'entête du paquet des données dans le Q-CBRP.

ID du paquet	Adresse source	Adresse destination	Liste des nœuds visités	TTL	R (bps)
--------------	----------------	---------------------	-------------------------	-----	---------

*Figure 3.6 : En-tête du paquet des données*

Ce paquet diffère de celui du CBRP par l'ajout de trois paramètres: le TTL (Time To Live) contenant un compteur décroissant du nombre de nœuds intermédiaires traversés afin d'éviter le routage en boucle, la gestion de la bande passante disponible (R) pour garantir la qualité de service traduisant la bande passante minimale requise par un client maillé pour transmettre ses données et enfin la liste des nœuds visités permettant de stocker les identificateurs des nœuds utilisés (la route) lors de la transmission des données.

Dans notre algorithme la table de routage des chefs de groupe est identique à celle du protocole CBRP, mais une amélioration est effectuée au niveau de la table des passerelles.

La nouvelle table des passerelles gère les informations concernant le nœud lui même et la bande passante disponible. Nous avons ajouté à cette table (*Figure 3.7*), le critère de la bande passante disponible signifiant que lorsqu'un paquet de données est envoyé à la destination ou un nœud intermédiaire, la bande passante voulue sera réservée naturellement. Pour exécuter efficacement cette fonction de gestion de la bande passante, un mécanisme de contrôle d'admission a été ajouté pour bloquer les flux émis quand il n'y aura pas assez de bande passante disponible pour éviter au maximum les pertes de paquets.



ID des clusters	ID des Membres	Bande passante disponible
-----------------	----------------	---------------------------

Figure 3.7: Table de la passerelle dans Q-CBRP

### 3.6.1. Fonctionnement du Q-CBRP

Chaque nœud membre conserve une table appelée table des membres (*Figure 3.2*) contenant toutes les adresses des nœuds membres voisins. Chaque nœud membre stocke également l'adresse du Cluster Head à qui il appartient. Le Cluster Head à son tour maintient également les informations des membres, ainsi que les informations des passerelles. Cette dernière en plus des informations des Clusters Head voisins, a des informations sur sa propre bande passante instantanée, ainsi que la bande passante disponible au niveau des Cluster Head.

Le routage dans le Q-CBRP se fait de la manière suivante:

- Chaque fois qu'un nœud génère une demande pour un transfert de données à un nœud destination, il vérifie l'adresse du nœud destination dans sa propre table. Si le nœud correspondant est trouvé dans la table membre, une autorisation de communiquer directement est adressée au CH, qui y répond en lui allouant une fréquence de canal de communication pour éviter les interférences, chose qui n'existait pas dans le fonctionnement du CBRP basique.
- Le Cluster Head vérifie l'identificateur de la destination dans sa table. Si aucune correspondance n'est trouvée, le Cluster Head va chercher cet identifiant dans la table du nœud passerelle où la bande passante exigée par le flux y est disponible.
- Le paquet de données est envoyé au nœud auquel la largeur de bande requise est disponible. L'adresse ou l'identificateur du nœud passerelle sera porté dans la liste des nœuds visités. Ce mécanisme a été ajouté par nos soins au protocole CBRP de base, pour garantir la QoS avec une probabilité maximale.
- Ce processus se poursuivra jusqu'à ce que le nœud de destination est atteint, ou le compteur TTL arrive à expiration. Si le TTL est dépassé et la destination n'est toujours pas atteinte, alors le paquet sera immédiatement détruit afin d'éviter que les requêtes tournent indéfiniment dans le réseau (routage en boucle), surtout que la topologie est en constante évolution. Cette démarche n'existait pas dans le protocole CBRP de base, où on

pouvait donc rencontrer des paquets tournant en rond indéfiniment, surchargeant le réseau inutilement.

- Et enfin si un paquet arrive au nœud Cluster Head ou le nœud passerelle et l'un des deux nœuds ne possède pas la bande passante requise pour le transport de ce flux, le mécanisme de contrôle d'admission se déclenche automatiquement, afin de suspendre le trafic le moins prioritaire pour une certaine période très réduite, évitant ainsi la dégradation drastique des paramètres de QoS des applications temps réel.
- A propos de l'estimation de la bande passante, nous avons optés pour une méthode très simple et classique, appelé l'estimation par mesure ou l'estimation active (intrusive), qui est une méthode dont l'émetteur envoie vers la destination des paquets de même taille, la source augmente petit à petit le débit des paquets et le récepteur mesurera la bande passante.

### **3.7. Évaluation des performances par simulation**

Dans les sections suivantes, nous commencerons par la description de l'ensemble des paramètres de simulation ainsi que les différents paramètres de QoS auxquelles nous nous sommes intéressés. Ensuite, nous présenterons l'ensemble des résultats obtenus tout en fournissant les interprétations nécessaires. Enfin, les performances des protocoles CBRP, Q-CBRP et AODV ont été comparées; ces comparaisons ont été menées sous des conditions différentes de densité du réseau.

#### **3.7.1. Environnement de simulation**

Pour l'évaluation des performances des protocoles CBRP, Q-CBRP et AODV, nous avons utilisé le simulateur NS version 2.34 [62], [63]. Le réseau considéré est composé successivement de 20, 40 et enfin 60 nœuds wifi maillés.

La norme IEEE 802.11 DCF (Distributed Coordination Function) MAC a été utilisée comme base pour les expériences avec une capacité de transmission de 2Mb/sec. La portée de transmission de chaque nœud a été fixée à 250m. Le CBR est utilisé comme source de trafic. Les paramètres de simulation sont résumés dans le *tableau 3.2*.

Paramètre	valeur
Portée de transmission	250m
Fréquence de propagation	2.4Ghz
Temps de simulation	640s
Taille de la topologie	1200m*1000m
Modèle Phy et MAC	802.11
Interface de file d'attente	PriQueue
Type d'antennes	OmniAntenna
Type de trafic	CBR UDP
Placement des nœuds mobiles	Aléatoire
Nombre des nœuds	20, 40, 60

Tableau 3.2 : Paramètres de simulation

Dans notre modèle, nous avons choisi une topologie qui reflète le réseau wifi maillé. Dans notre topologie nous avons deux types de nœuds: des nœuds fixes jouant le rôle de routeurs maillé et en même temps pouvant être élus directement comme Clusters Head ou passerelles, des nœuds mobiles, utilisant une mobilité aléatoire (voir Annexe A), considérés comme les clients maillés.

Trois métriques sont exploitées afin d'évaluer notre solution: le délai moyen (Average Delay), la surcharge du réseau (Overhead) et le taux de paquets reçu (PDR: Packet Delivery Ration). Le choix de ces métriques est basé sur leur pertinence et leur utilisation fréquente dans l'évaluation des solutions citées dans l'état de l'art [42], censées améliorer la QoS des applications multimédia.

### 3.8. Discussion des résultats

Nous avons entrepris une comparaison entre les trois protocoles (AODV, CBRP et Q-CBRP) en faisant varier le nombre des clients maillés sur la base des paramètres mentionnés dans le *Tableau 3.2*, en fonction du temps de simulation.

### 3.8.1. Taux de paquets reçu (PDR)

Les figures 3.8, 3.9 et 3.10 illustrent les résultats de simulation de ces trois protocoles de routage sur la base du PDR en fonction du temps de simulation en augmentant le nombre de nœuds maillés.

Ces résultats montrent que notre approche (Q-CBRP) et le CBRP donnent de meilleures performances concernant le PDR par rapport à l'AODV, avec un avantage sensible au protocole amélioré (Q-CBRP) de 93% en moyenne et de 84 % pour le CBRP, par contre l'AODV affiche un taux moyen de 70 %.

Entre le Q-CBRP, le CBRP et l'AODV, le premier protocole donne un taux supérieur lors de l'augmentation de la taille du réseau maillé, ce qui permet de conclure que notre proposition affiche un passage à l'échelle aisé.

Nous pouvons dire aussi que l'approche du Clustering génère un taux de paquet délivré beaucoup plus intéressant par rapport aux protocoles de base comme AODV, ceci est justifié par les nombreux avantages inhérents à cette architecture qui s'adapte très bien au réseau maillé.

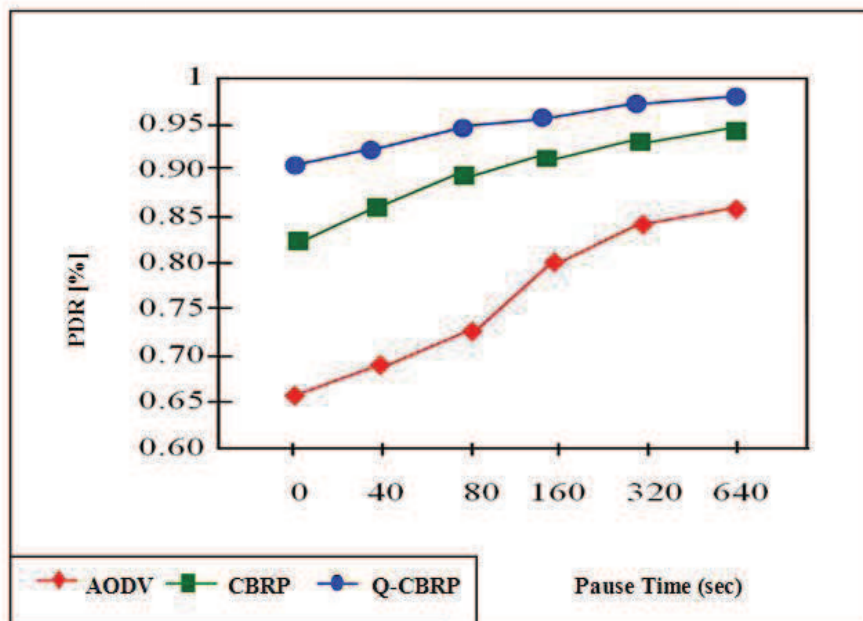


Figure 3.8. PDR en fonction du temps de pause pour 20 nœuds

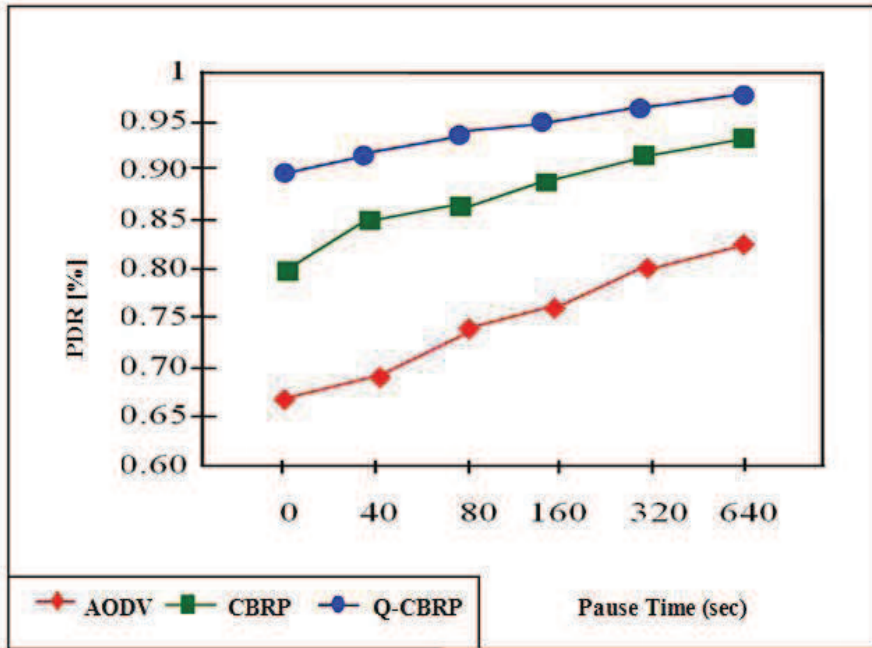


Figure 3.9. PDR en fonction du temps de pause pour 40 nœuds

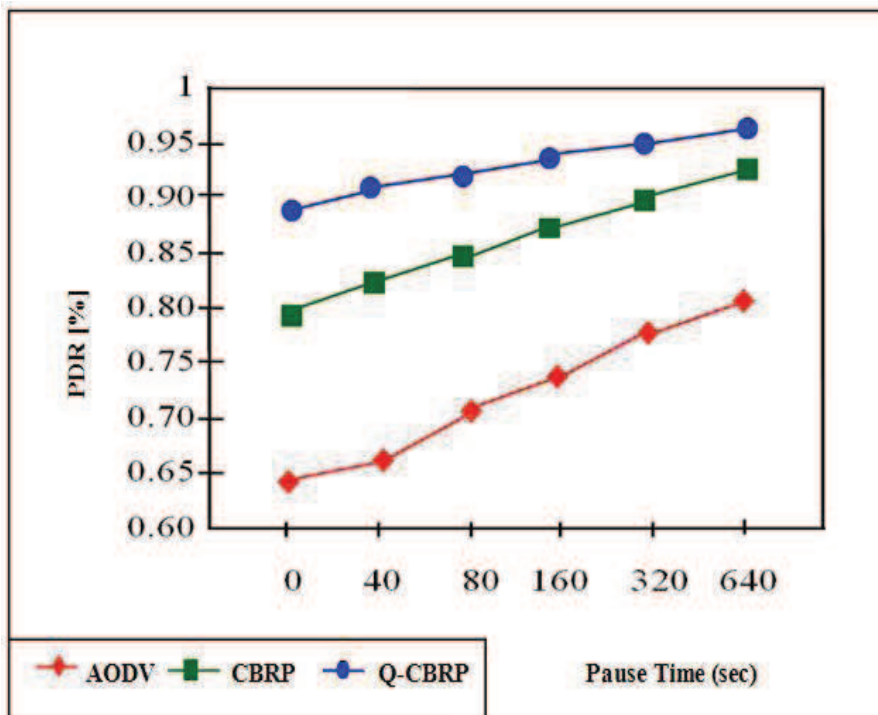


Figure 3.10. PDR en fonction du temps de pause pour 60 nœuds

### 3.8.2. Délai moyen

Les figures 3.11, 3.12 et 3.13 représentent les résultats de simulation en termes de délai moyen en fonction du temps de simulation en augmentant le nombre de nœuds maillés.

A partir de ces illustrations, nous remarquons que l'augmentation du délai moyen dans le réseau wifi maillé est proportionnelle à l'augmentation du nombre de nœuds clients.

Le délai est influencé par plusieurs phénomènes dans le réseau, pouvant être simultanés et pour une période courte. Parmi ces phénomènes nous pouvons citer les plus importants: le temps mis par les protocoles de routage pour trouver la route valide vers la destination, le temps d'attente et de traitement dans les files d'attente des routeurs intervenant dans le routage, la rupture d'une route, ou bien la retransmission des données lorsqu'un paquet est soit perdu ou bien n'est pas arrivé à destination.

En comparant les trois protocoles en question, le Q-CBRP reste le plus avantageux dans les trois cas simulés pour un réseau maillé donné, en raison de la disparition de la diffusion de l'information de routage à tous les nœuds et aussi de la diminution des messages de contrôle.

Il faut rappeler que l'AODV est un protocole très performant en termes de délai en comparaison avec les autres protocoles classiques comme OLSR, DSDV et DSR; mais face à la souplesse et l'efficacité du protocole en Clustering étudié, il ne fait clairement pas le poids.

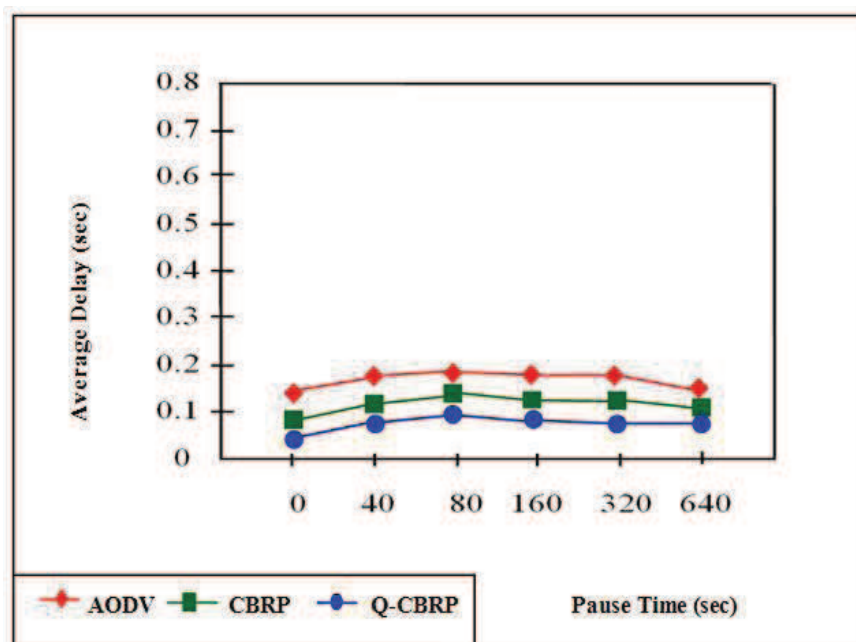


Figure 3.11. Délai moyen en fonction du temps de pause pour 20 nœuds

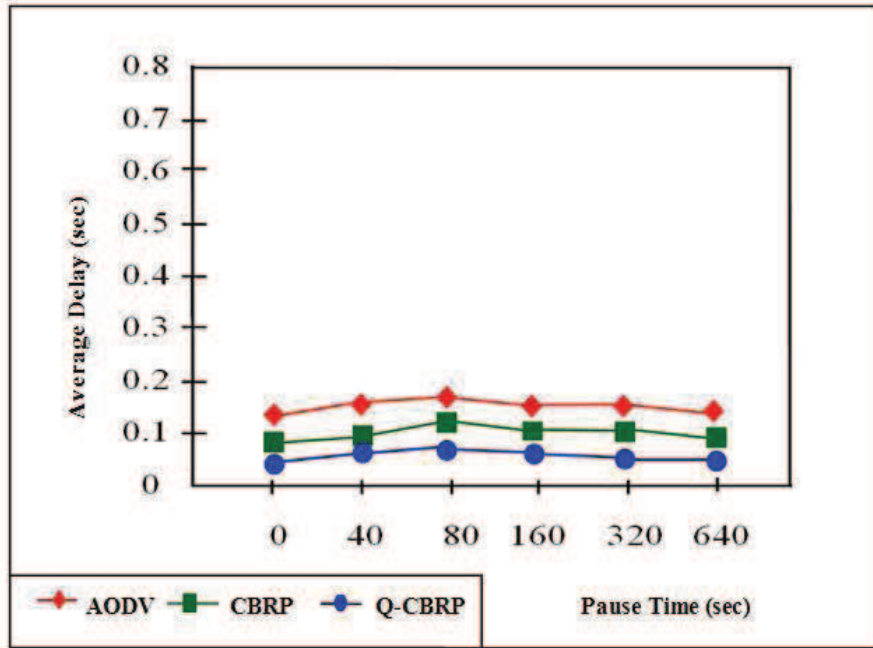


Figure 3.12. Délai moyen en fonction du temps de pause pour 40 nœuds

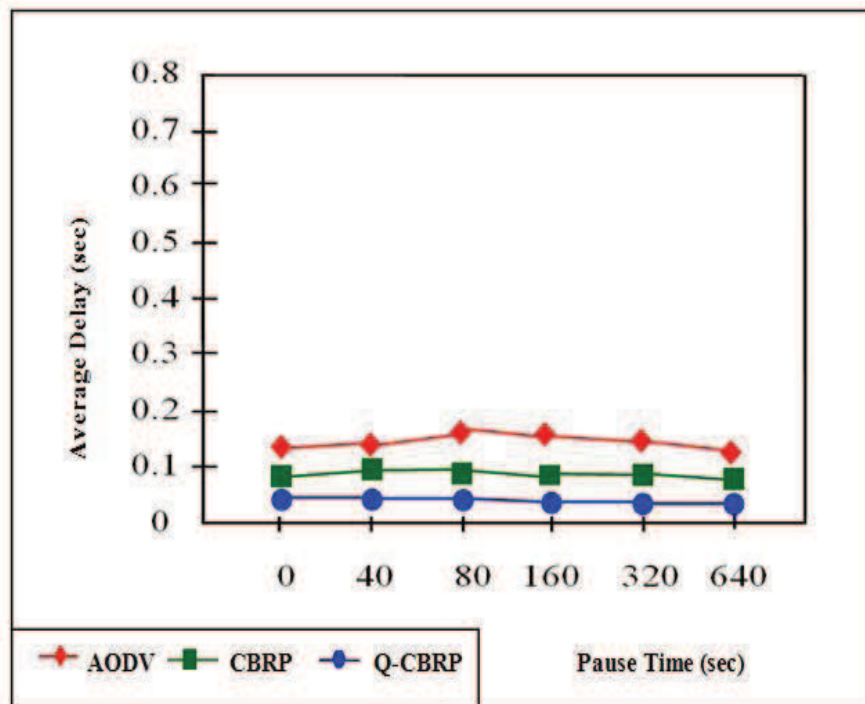


Figure 3.13. Délai moyen en fonction du temps de pause pour 60 nœuds

### 3.8.3. Surcharge du réseau (Overhead)

Les figures 3.14, 3.15 et 3.16, illustrent le rendement de Q-CBRP, CBRP et AODV en évaluant l'overhead dû aux informations de routage en fonction du temps.



La moyenne du taux d'overhead est de 1.45, 2.41 et 3.20 respectivement pour les protocoles Q-CBRP, CBRP et AODV.

Ces résultats sont prévisibles et explicables, grâce à un gain important dans la quantité d'informations de routage nécessaires aux deux protocoles Q-CBRP et CBRP par rapport à AODV, et aussi à la purge de tout ce qui encombre le réseau inutilement faite régulièrement par Q-CBRP et pas par CBRP.

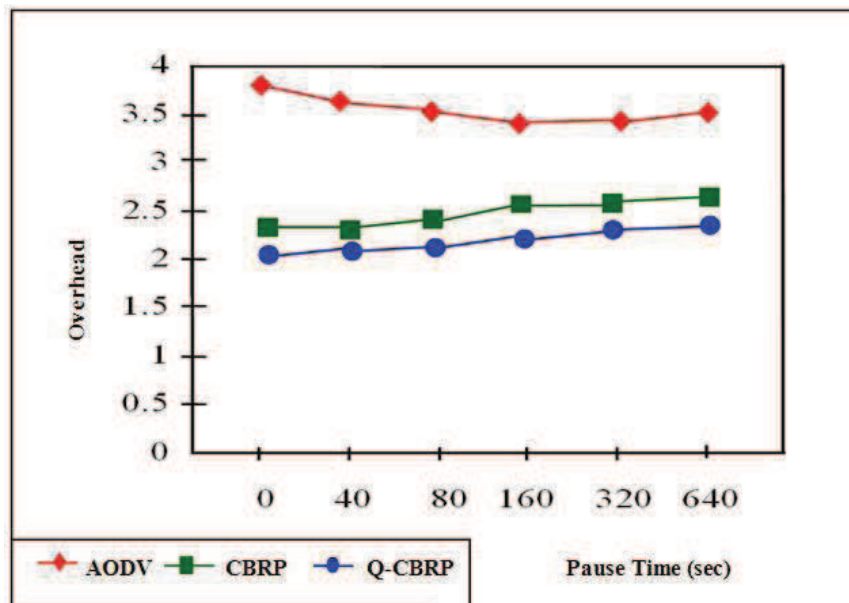


Figure 3.14 : Overhead en fonction du temps de pause pour 20 nœuds

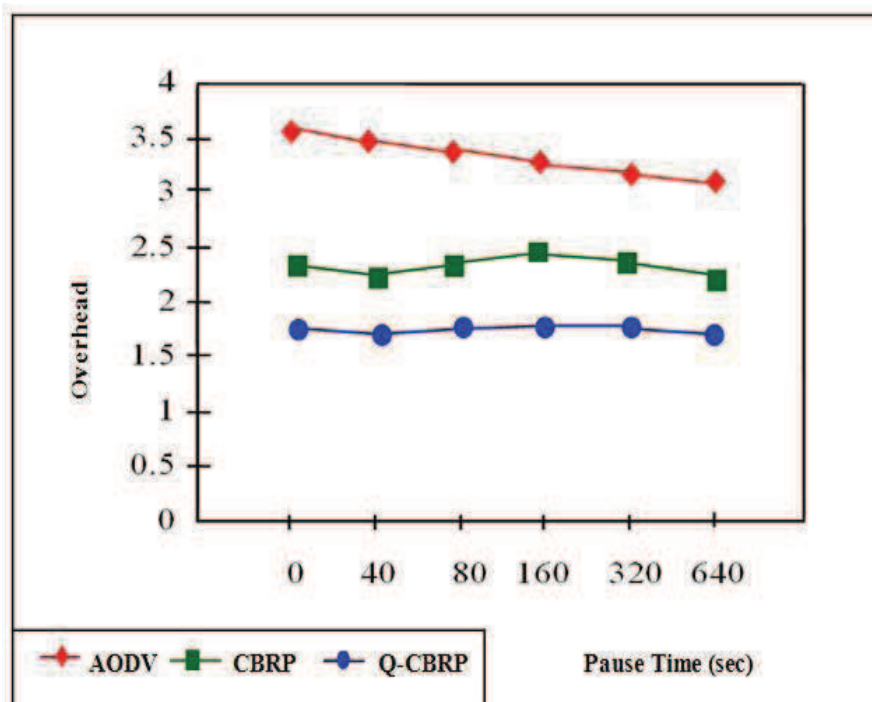


Figure 3.15 : Overhead en fonction du temps de pause pour 40 nœuds



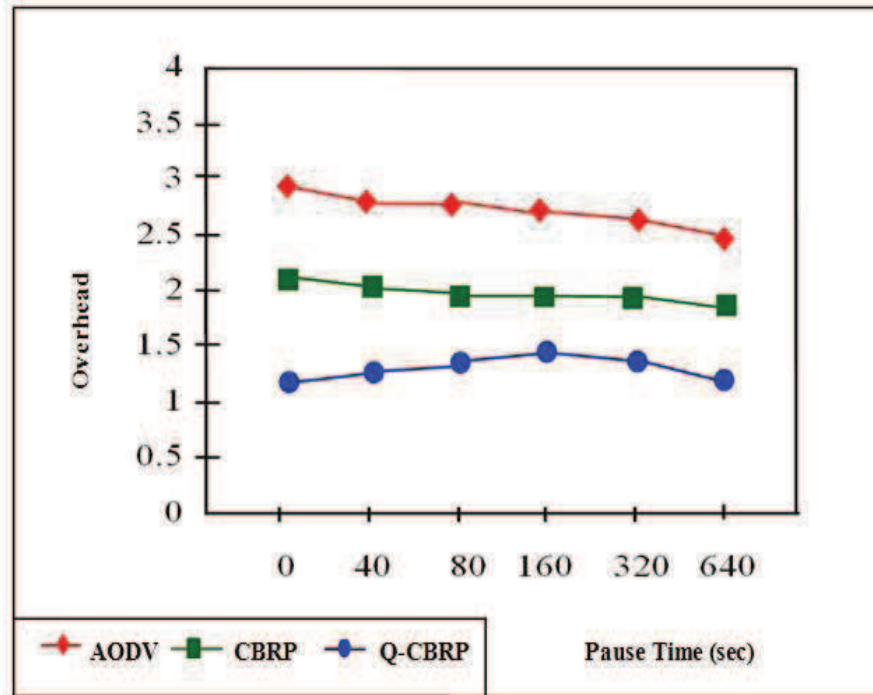


Figure 3.16: Overhead en fonction du temps de pause pour 60 nœuds

### 3.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné une comparaison entre les performances de notre algorithme Q-CBRP et deux autres protocoles de routage AODV et le CBRP très utilisé dans les réseaux de capteurs. Ces protocoles de routage ont été comparés en termes de taux de livraison de paquets, de délai moyen et de l'overhead, tout en variant le nombre de nœuds maillés clients mobiles.

Nous pouvons conclure que la topologie en clusters apporte une évolutivité et une efficacité de routage, au wifi maillé mobile, plus que satisfaisante. Le protocole CBRP en particulier a montré des aptitudes convaincantes, ce qui nous a poussés à l'étendre à la gestion de la bande passante des CH ou passerelles, pour supprimer de la route à découvrir les nœuds ne répondant pas aux besoins des flux. Un contrôle d'admission y a été ajouté pour régler le problème de la saturation des CHs. Tout cela a été fait par l'intermédiaire de modification de l'en-tête des paquets de routage, ainsi que quelques modifications sur la table de routage. Finalement, notre protocole Q-CBRP rend le réseau maillé capable de transporter des flux multimédia en offrant un débit plus large et plus stable par rapport aux autres protocoles.

## 4.1. Introduction

La mobilité des utilisateurs et leurs besoins d'accès itinérant aux réseaux informatiques est devenue une exigence. 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 fil allant des réseaux personnels à faible couverture jusqu'aux réseaux à couverture mondiale. 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. Au niveau physique, de nouvelles propositions, appelées amendements, 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 réseaux locaux sans fil (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 standard IEEE 802.11e qui s'intéresse à introduire le support de la qualité de service (QoS) dans le standard 802.11.

Dans ce chapitre, nous allons présenter notre deuxième contribution consistant à exploiter les résultats obtenus dans la première contribution et de les combiner avec des modifications effectuées au niveau de la couche liaison pour avoir à la fin un réseau plus efficace et robuste, pouvant aisément garantir la QoS.

Lors du chapitre précédent, nous avons présenté un protocole de routage à clusters, plus efficace que les protocoles standards, habituellement utilisés. Nous avons validé notre approche par des simulations sur un réseau maillé mobile, et ainsi démontré les avantages de notre proposition en termes de QoS.

L'opération de routage une fois terminée, aussi efficace soit elle et rapide, si l'opération de transmission des données n'est pas aussi efficace et aussi performante, surtout en termes de QoS, nos efforts de routage rapide et optimal seront vains. C'est pour cette raison, que nous avons jugé opportun de regarder les fonctionnalités de la couche liaison (plus précisément la

sous couche MAC) pour proposer et mettre en œuvre les mécanismes existants et proposés par le standard 802.11e, qui compléteraient, augmenteraient ou maintiendraient les performances auxquelles nous sommes arrivés.

Ce qui nous amène au fait que dans ce chapitre, nous avons été amenés d'abord à passer en revue les propositions du standard 802.11e, pour en choisir celles, qui à notre avis, sont vitales à la garantie d'une certaine QoS.

## 4.2. Introduction au standard IEEE 802.11e

La norme 802.11e a adopté la solution basée sur les files d'attente et les différenciations entre les classes de trafic. Parmi ces extensions nous pouvons citer:

- a) EDCA (Enhanced Distributed Channel Access)
- b) HCCA (Hybrid Controlled Channel Access)
- c) DLP (Direct Link protocol)
- d) Contention Free Bursts
- e) Nouvelles règles d'acquiescement (BlockAck, No Ack)

### 4.2.1. EDCA

EDCA [66] [67] a apporté une différenciation et une distribution à l'accès au canal en introduisant les catégories de trafic (Access Category AC) pour les stations (*Tableau 4.1*).

Priority	Access Category	Designation
1	0	Background
2	0	Background
0	0	Best Effort
3	1	Video Probing
4	2	Video at 1.5 Mbps
5	2	Video at 1.5 Mbps
6	3	Voice at 64 Kbps
7	3	Voice at 64 Kbps

*Tableau 4.1 : Priorités d'accès des différents flux dans le 802.11e*

Quand une trame arrive à la couche MAC, elle est étiquetée avec un identificateur de trafic TID (Traffic Identifier) selon ses besoins en QoS, qui peut prendre les valeurs de 0 à 15. Les trames avec TID compris entre 0 et 7 sont placées dans quatre files d'attente (AC) et seront gérées par EDCA. D'autre part, les trames avec des valeurs de TID comprises entre 8 et 15

sont placées dans huit files d'attente (TS) et gérées par HCCA. Ca permet d'avoir une QoS paramétrée stricte avec les TS et une QoS prioritaire avec les AC.

Une autre caractéristique principale du 802.11e est le concept du créneau de transmission TXOP (Transmission Opportunity), qui permet de chronométrer l'intervalle de temps autorisé pour qu'une station particulière transmette des paquets. Pendant le TXOP, il peut y avoir des séries des trames transmises par une station séparées par SIFS. La valeur maximum de TXOP s'appelle TXOPLimit, qui est déterminé par le QAP (QoS AP).

La *Figure 4.1* montre que dans EDCA, chaque STA (QSTA) possède 4 files AC, pour supporter 8 UPs (User Priorité). Par conséquent, un ou plusieurs UP sont ramassés dans la même file AC. Ceci vient de l'observation qu'habituellement huit types d'applications ne transmettent pas leurs trames simultanément, et que employer moins d'AC que d'UP, réduit l'overhead de la couche MAC. Chaque AC concoure pour l'obtention d'un temps de transmission  $TXOP < TXOPLimit$  et lance indépendamment un processus de Backoff après avoir détecté un canal libre pendant une période IFS arbitraire (AIFS au minimum égal à DIFS), choisie individuellement pour chaque AC. Chaque file d'attente AC travaille comme une STA DCF indépendante et utilise ses propres paramètres Backoff et différentes tailles de l'InterFrame Space (IFS) [68].

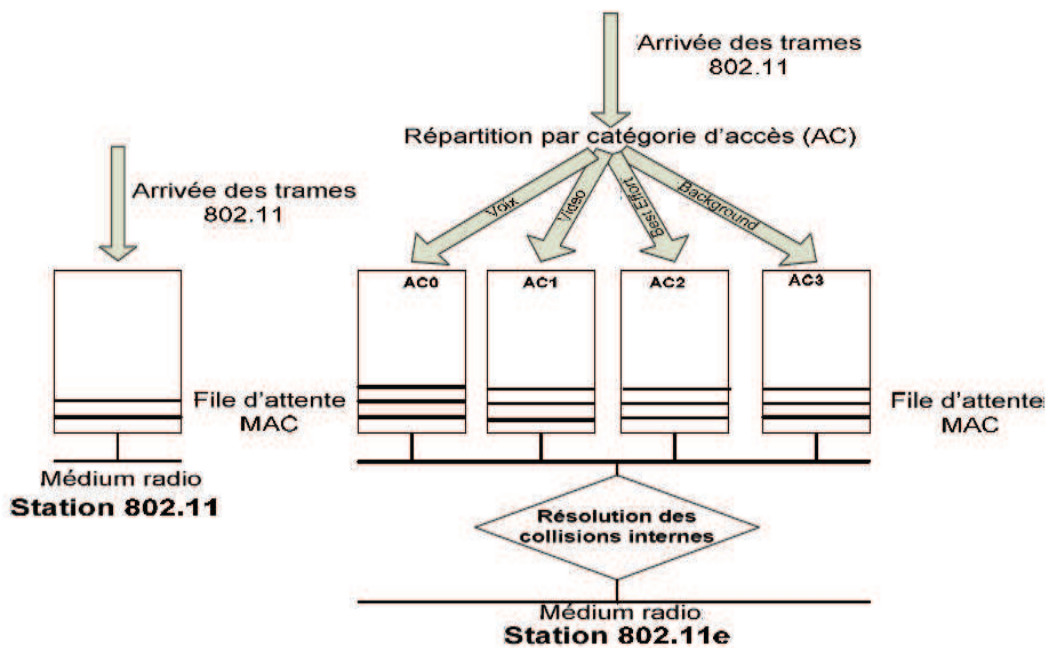


Figure 4.1. Accès au média sans fil en mode EDCA (IEEE 802.11e)

Une deuxième méthode, pour différencier les files d'attente consiste à assigner différentes valeurs de CWmin aux AC. Assigner une petite valeur CWmin à l'AC le plus prioritaire assure que dans la plupart des cas, la file AC prioritaire peut transmettre des paquets avant la moins prioritaire. Si les compteurs Backoff de deux ou plusieurs AC dans la même QSTA atteignent la valeur zéro au même moment, un ordonnanceur à l'intérieur de la QSTA évitera la collision virtuelle par l'octroi d'un EDCA-TXOP plus grand à l'AC le plus prioritaire. En même temps, les autres AC ayant subi une collision entrent dans un processus Backoff et doublent la valeur de CW, comme pour une collision externe. De cette façon, EDCA est censé améliorer l'exécution de DCF dans des conditions de congestion. La valeur par défaut d'AIFSN [AC], CWmin [AC], CWmax [AC] et TXOPLimit [AC] sont annoncés par le QAP dans les trames beacon. Le standard 802.11e permet aussi au QAP d'adapter ces paramètres de manière dynamique en fonction des conditions du réseau [69], mais comment tout cela doit se faire, n'a pas été indiqué et reste donc du domaine de la recherche [70-82].

Pour améliorer le débit de transmission, le mécanisme d'envoi de plusieurs trames par la même QSTA dans EDCA peut être utilisé, c'est à dire qu'une QSTA ayant gagné un EDCA-TXOP, peut transmettre plusieurs trames pendant TXOPLimit sans reconcourir pour l'obtention du canal. Pour s'assurer qu'aucune autre QSTA n'interrompt le processus, SIFS est utilisé entre l'envoi de trames consécutives. Si une collision se produit, le mécanisme est interrompu. Ce mécanisme peut réduire l'overhead du réseau et augmenter le débit par l'utilisation de l'acquiescement groupé. Cependant, il peut aussi augmenter la jitter, donc le TXOPLimit ne doit pas être plus grand que le temps requis pour la transmission de la plus grande trame de données.

Comme nous l'avons évoqué lors de la description du mécanisme d'accès EDCA, la différenciation de services est basée sur l'utilisation des trois paramètres de différenciation. AIFS(AC), CW(AC) (CWmin(AC), CWmax(AC)) et TXOPLimit(AC). Ces paramètres ne sont pas figés dans le standard comme dans DCF et peuvent être modifiés dynamiquement par le QAP pour les quatre ACs par l'intermédiaire de ce qu'on appelle l'EDCA Parameter Set Element. Ces paramètres sont envoyés par le QAP aux QSTAs dans les trames de balise. Cet ajustement permet aux STAs dans le réseau de s'adapter aux changements des conditions du réseau, et donne au QAP la possibilité de gérer la performance globale du réseau.

### **4.3. Limitations du 802.11e pour les applications multimédia**

Comme nous l'avons souligné dans les sections précédentes de ce chapitre, 802.11e a été standardisé dans le but de permettre au WLAN de supporter la QoS par la différenciation des classes de services au niveau de la couche MAC. Cette différenciation est effectuée de telle sorte que la couche MAC puisse acheminer les trafics temps réel et multimédia, en plus du trafic traditionnel de données best effort. Cependant, malgré toutes les améliorations apportées aux mécanismes d'accès de la couche MAC par ce nouveau standard, il reste incapable de garantir la QoS requise par les applications temps réel et multimédia comme la voix et la vidéo. Aujourd'hui, ce standard seul ne peut pas constituer une plate-forme rigide pour ce type d'applications. En effet, quand un réseau WLAN n'est pas saturé, la différenciation de service fonctionne correctement et offre au trafic multimédia l'opportunité d'être servi avec un bon niveau de QoS. Cependant, le problème apparaît une fois que le réseau commence à atteindre une situation de charge élevée. Dans cette situation, tous les types de trafic souffrent d'un taux de collision important, d'un grand nombre de retransmissions, de délais d'accès très grand et d'un déficit en bande passante. Ceci résulte des dégradations importantes de la QoS perçue par les applications multimédia.

En plus des études par simulations qui ont été réalisées pour l'évaluation de performances d'EDCA et HCCA, on cite ici à titre d'exemple [83-87]. La capacité du 802.11e à supporter la QoS des applications temps réel et multimédia a été évaluée dans plusieurs travaux comme [88-103]. Le comportement du protocole dans les différentes conditions de trafic et pour les différents besoins des applications a été également investigué. Les résultats ont montré qu'EDCA et HCCA permettent d'obtenir la différenciation de service et sont plus efficaces que DCF et PCF. Mais en présence de plusieurs trafics menant à une augmentation de la charge (c.à.d. dans le cas de saturation), EDCA et HCCA atteignent très rapidement leurs limitations pour le support des applications temps réel.

#### **4.3.1. Besoin de faire des ajustements des paramètres des flux**

Nous avons trouvés dans l'état de l'art une quantité importante de travaux sur la sélection des paramètres des flux, qui influe considérablement sur la performance globale du réseau. Pour une situation donnée, une configuration adaptée peut aboutir à l'utilisation optimale des ressources réseau alors qu'une mauvaise configuration peut être la cause de pertes de capacité

et par suite de rejets de flux alors que les ressources radio sont susceptibles de prendre en considération ces flux.

Donc, pour améliorer la performance de notre réseau (utiliser la capacité maximale du réseau et accepter le plus grand nombre possible de flux), il faut y intégrer un mécanisme d'optimisation des paramètres des flux, qui prend en compte la situation du réseau, les caractéristiques des flux actifs et leurs besoins en QoS.

Il est prévu dans 802.11e [104] que les paramètres des flux puissent être changés dynamiquement par le point d'accès et communiqués à toutes les stations par l'utilisation du « QoS parameter set element » comme nous l'avons expliqué dans le Chapitre 1. Il suffit donc au point d'accès de trouver les valeurs optimales, puis les communiquer aux stations actives. Ces dernières les utiliseront dans la prochaine contention au canal et le réseau aura un fonctionnement optimal.

La problématique essentielle réside dans la méthode d'optimisation. En effet, connaître les valeurs optimales des paramètres des flux pour une situation donnée est a priori un problème complexe à résoudre. Au mieux de notre connaissance, ce problème n'a pas pu être résolu à ce jour. On trouve des études d'ajustement et d'adaptation des paramètres des flux, dans le but d'améliorer les performances, des études d'optimisation simple-objectif qui cherchent à maximiser la capacité du réseau.

Dans ce qui suit, nous allons exposer quelques travaux autour de l'adaptation des paramètres des flux.

#### **4.4. Les travaux d'adaptation des paramètres des flux**

Le problème d'adaptation des paramètres des flux a attiré l'attention des chercheurs [105-116] suite à la publication des études qui ont montré l'influence de la configuration de ces paramètres sur la performance globale du réseau.

1. **Cali et al, [116], [117]**, avant même l'apparition de 802.11e, ont démontré par des simulations que pour certaines configurations, un réseau 802.11 peut opérer loin de sa capacité maximale et un simple ajustement de la fenêtre de contention pouvait déjà le rapprocher de cette capacité. Ils proposent alors une méthode distribuée qui permet à chaque station d'ajuster son CW dans le but de s'approcher de la limite maximale du débit atteignable.



2. **Dans [112]**, les auteurs proposent une méthode d'adaptation des deux paramètres CWmin et TXOPLimit. La méthode proposée est basée sur de simples équations non justifiées. Dans ces équations, le facteur d'ajustement de CWmin de l'ACi est le rapport de son délai tolérable sur le délai tolérable de l'AC0. Pour sa part, le facteur d'ajustement de TXOPLimit de l'ACi est le produit du rapport de délai avec le rapport des bandes passantes requises de l'ACi et de l'AC0.

3. **Narbutt et Davis dans leur travail [113], [114]**, ont effectué des tests expérimentaux sous le système Linux avec des pilotes MadWiFi [135] en utilisant à chaque test des valeurs différentes pour les paramètres des flux. Le but était de voir l'effet des différentes valeurs sur la performance de l'AC\_VO quand elle coexiste avec l'AC\_BK. C'est donc une étude expérimentale comparative de quelques configurations de paramètres des flux et ne constitue pas vraiment un processus d'adaptation ou d'ajustement de ces paramètres. Les résultats expérimentaux ont montré que le paramètre AIFS protège de manière plus efficace le trafic voix du trafic background que le paramètre CWmin, et que le changement du paramètre TXOPLimit n'améliore pas la qualité de la transmission de la voix.

4. **Dans [115]**, on retrouve également une simple étude comparative par simulation pour voir l'effet de TXOPLimit sur la performance globale. Dans l'ensemble des simulations, les auteurs augmentent le nombre de trames transmises pendant l'accès au canal pour toutes les ACs de la même façon pour voir l'influence de cette augmentation sur la performance globale. Ceci veut dire que l'étude est faite sans différenciation par TXOPLimit.

5. **Koukoutsidis [118]** examine la sélection optimale des paramètres d'accès d'un trafic élastique en présence d'un trafic temps réel dont les paramètres d'accès sont fixes. Il a démontré l'optimalité d'utiliser de grandes valeurs de TXOP et AIFS pour maximiser le débit du trafic élastique tout en garantissant de faibles délais pour le trafic temps réel. Il a abouti aussi au résultat que CWmin, AIFS et TXOP ont plus d'influence que CWmax. Ce dernier n'a aucun effet dans les conditions de non-saturation. Selon les résultats de ce travail, dans le cas d'une seule classe de trafic, ayant une valeur fixe TXOPLimit, une sélection optimale de CWmin (CWmin optimale) est pratiquement suffisante pour atteindre la meilleure capacité et la haute performance. Alors que dans le cas de présence d'une classe de trafic élastique avec une classe de trafic temps réel, la maximisation du débit de la classe élastique peut être achevée par l'exploitation des TXOPLimit, alors que les contraintes de délai de la classe temps réel peuvent être atteintes en augmentant la différence entre les AIFS des deux classes.



La valeur de  $CW_{min}$  de la classe élastique peut être mise à sa valeur optimale ( $CW_{min}$  optimale) si le trafic temps réel n'est pas très important. Si ce dernier augmente, la valeur de  $CW_{min}$  doit être ajustée à des valeurs inférieures. Pour finir, du fait que  $CW_{max}$  n'a pas une influence sur la performance, sa valeur peut être fixée à une valeur constante.

Cependant, pour les adaptations des paramètres de différenciation, basées sur les mesures l'inconvénient essentiel de ces mécanismes est qu'ils causent des oscillations de performances. En effet, les stations ajustent perpétuellement leurs paramètres d'accès (à chaque intervalle de mesure), ce qui n'est pas conseillé, donc du coup, nous avons proposé des valeurs fixes aux différents flux.

#### **4.5. Le modèle proposé**

Dans notre approche, nous utilisons un modèle qui fonctionne avec deux couches (réseau et liaison) Dans la première couche, nous réutilisons le protocole de routage étudié au chapitre précédent (Q-CBRP), et nous allons modifier dans la deuxième couche quelques paramètres utilisés dans le standard 802.11e.

Dans le mécanisme d'accès en mode EDCA/DCF, ce mode fait appel à plusieurs tranches de temps fixe, comme  $CW_{min}$ ,  $CW_{max}$ , et AIFS. Nous allons modifier d'une manière judicieuse les valeurs du standard, mentionnées dans le *Tableau 4.2*.

Le TXoP, malgré son importance à améliorer la QoS au sein d'un réseau sans fil d'une manière générale, a été ignoré par les chercheurs dans leurs simulations. Dans notre cas, nous allons prendre en compte ce paramètre et le faire varier selon les priorités des flux.

Paramètres	Valeurs
Time Slot	20us
Beacon intervalle	100ms
Fragmentation threshold	1024bytes
RTS threshold	500bytes
SIFS	20us
PIFS	40us
DIFS	60us
MSDU (Voice and Video)	60ms
MSDU (data)	200ms
Retry limit	7
TXOP limit	3000us

Tableau 4.2. Les paramètres originaux de l'IEEE 802.11e

Pour améliorer la performance de notre première proposition, en utilisant la capacité maximale du réseau et en acceptant le plus grand nombre possible de flux, il faut y intégrer un mécanisme d'optimisation des paramètres des flux pour prendre en compte la situation du réseau, les caractéristiques des flux actifs et leurs besoins en QoS.

#### 4.6. Scenario de Simulation

Dans notre simulation [119], nous avons utilisé trois files d'attentes, une pour la voix une pour la vidéo et seulement une pour le best effort et le background, pour maximiser la probabilité d'utilisation des applications multimédia sur le wifi maillé. Le changement des paramètres de contention: CWmin, CWmax, AIFSN et TXOP est illustré dans le *Tableau 4.3*. Le choix de ces valeurs a été beaucoup inspiré par les travaux de l'état de l'art, et donc nous avons essayé de trouver un compromis entre l'équité entre tous les flux et aussi favoriser légèrement les flux multimédias. Nous avons considéré dans notre scénario, l'existence d'un seul Cluster-Head fixe, et nous avons varié le nombre de clients mobiles entre 3 et 15. Chaque client transmet trois flux, dont deux sont multimédias (vidéo, voix sur IP et des flux de type Best effort) au même Cluster Head. Le *Tableau 4.3* résume les paramètres de simulation de notre scénario.

Paramètres de simulation	Voix	Vidéo	Best effort
Protocole de transport	UDP	UDP	UDP
CWmin	3	7	15
CWmax	7	15	1023
AIFSN	2	2	3
Taille des paquets (bytes)	160	1280	1500
Intervalle entre les paquets (ms)	20	10	12.5
Débit (kbps)	64	1024	960
TXOP <sub>limit</sub> (us)	3500	3000	2500

Tableau 4.3 : Les paramètres de simulations de notre scénario

Le Tableau 4.4 expose les valeurs originales du standard 802.11e, pour avoir une idée sur l'ordre de grandeur des changements que nous avons introduit dans nos paramètres de simulation.

Paramètres de simulation	Voix	Vidéo	Best effort
CWmin	7	10	31
CWmax	7	31	1023
AIFSN	1	2	3

Tableau 4.4 : Paramètres de simulation dans le standard 802.11e

#### 4.7. Résultats et discussions

Trois métriques sont utilisées pour évaluer les performances du réseau wifi maillé, le délai moyen, le débit et le taux de pertes des paquets.

Dans la suite, nous allons comparer les résultats de simulation du protocole de routage Q-CBRP utilisant des paramètres de contention proposés par le standard 802.11e, avec les résultats de simulation du même protocole de routage associé à des paramètres de contention proposés par nos soins.

#### 4.7.1. Le débit

Commençons par l'évaluation du débit représenté dans les *Figures 4.2 et 4.3*.

La *Figure 4.2*, illustre la variation du débit avec l'augmentation des nœuds clients maillés, en utilisant les paramètres de contention du standard 802.11e. Nous remarquons que tant que le nombre de clients est faible (3 à 9), l'impact des paramètres de contention n'est pas de très grande influence sur le débit, puisque les trois flux sont à égalité. Mais dès que le nombre des clients augmente, la différenciation entre les trafics est claire, avec un très bon avantage de la voix, suivie de la vidéo et le Best Effort.

En comparant la *Figure 4.2* avec la *Figure 4.3*, nous remarquons que les flux multimédia prennent un grand avantage dès que le nombre des stations est égal à neuf. Le flux best effort reste à seulement 1.4Mbps en le comparant avec celui de la figure 4.4 (3Mbps). Nous remarquons aussi une augmentation du débit des flux vidéo, tandis que la voix reste toujours la plus avantagée.

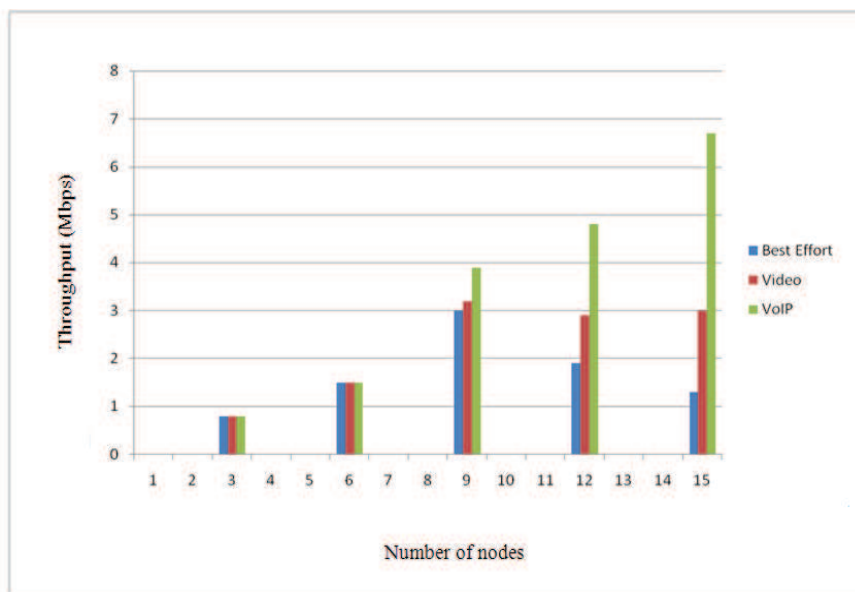


Figure 4.2. Simulation du débit en utilisant le Q-CBRP avec la couche MAC standard

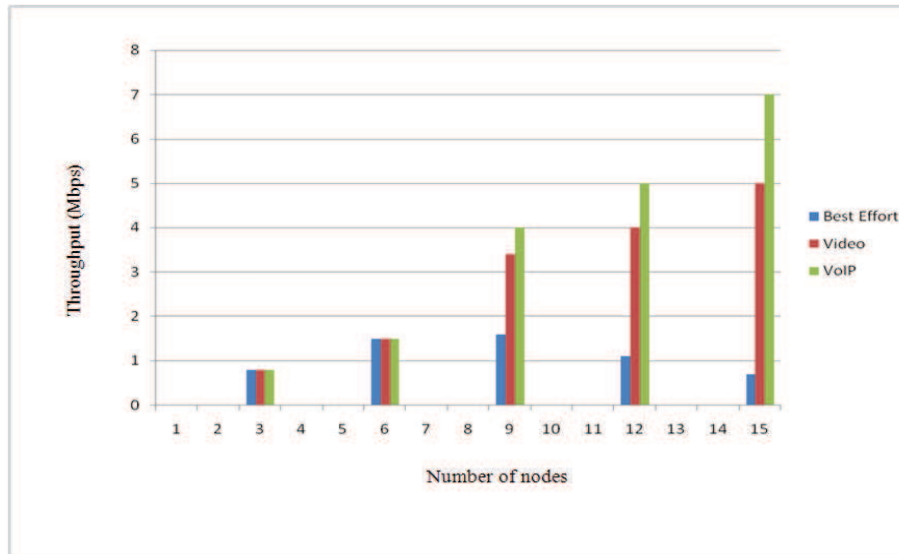


Figure 4.3. Simulation du débit en utilisant le Q-CBRP avec la couche MAC modifiée

#### 4.7.2. Perte de paquets

L'autre facteur très important dans l'évaluation de la QoS pour les applications multimédia, est le taux de pertes des paquets. Pour calculer le nombre des paquets perdus, nous avons fait la soustraction entre le nombre de paquets reçu au niveau du Cluster Head, et le nombre de paquets envoyés par les différents clients maillés.

Les Tableaux 4.5 et 4.6 montrent le taux de pertes des paquets en fonction du nombre de nœuds maillés. Les paramètres de simulation sont les mêmes utilisés dans le Tableau 4.3.

Nombre de nœuds	Best Effort	Vidéo	Voix
3	0 %	0 %	0 %
6	5.42 %	4.17 %	1.63 %
9	8.95 %	6.17 %	3.93 %
12	42.16 %	30.11 %	14.44 %
15	78.68 %	39.52 %	28.30 %

Tableau 4.5 : Taux de perte de paquets en fonction du nombre de nœuds, MAC standard

Nombre de nœuds	Best Effort	Vidéo	Voix
3	0 %	0 %	0 %
6	6.51 %	1.11 %	0 %
9	13.45 %	4.82 %	1.97 %
12	58.51 %	15.28 %	8.34 %
15	75.76 %	29.52 %	15.73 %

Tableau 4.6 : Taux de perte de paquets en fonction de nombre des nœuds, MAC modifié

Il apparaît clairement des résultats obtenus, que le service de différenciation entre les trois flux circulant dans le réseau wifi maillé, a un impact très important sur le taux de perte des paquets. Cet impact se confirme avec l'augmentation des nœuds. Dans le *Tableau 4.6*, nous avons désavantagé les flux Best effort pour avoir un taux très satisfaisant des flux multimédia par rapport aux résultats obtenus dans le *Tableau 4.5*.

### 4.7.3. Délai moyen

Les *Figures 4.4* et *4.5* représentent les résultats de simulation du délai moyen en fonction du nombre de nœuds.

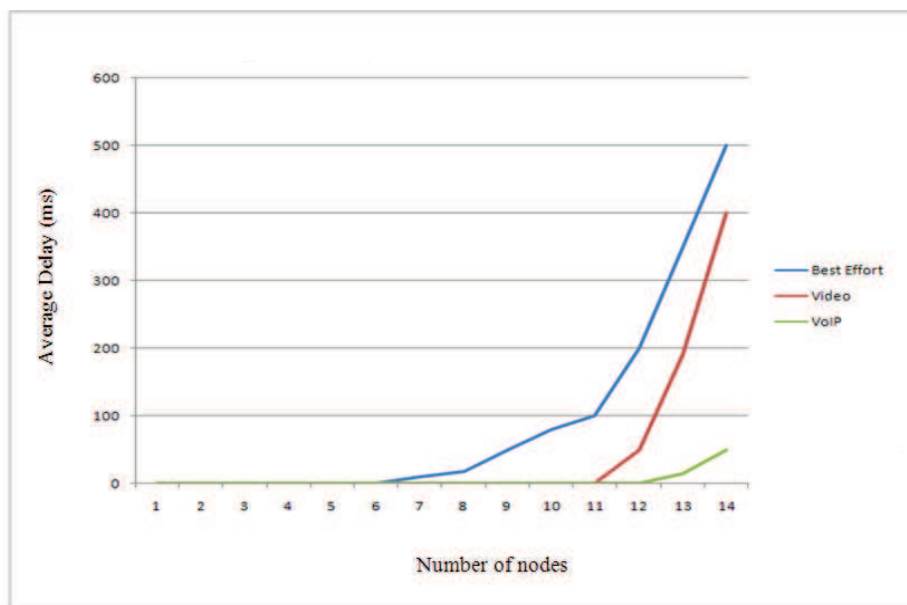


Figure 4.4. Simulation de délai en utilisant le Q-CBRP avec la couche MAC standard

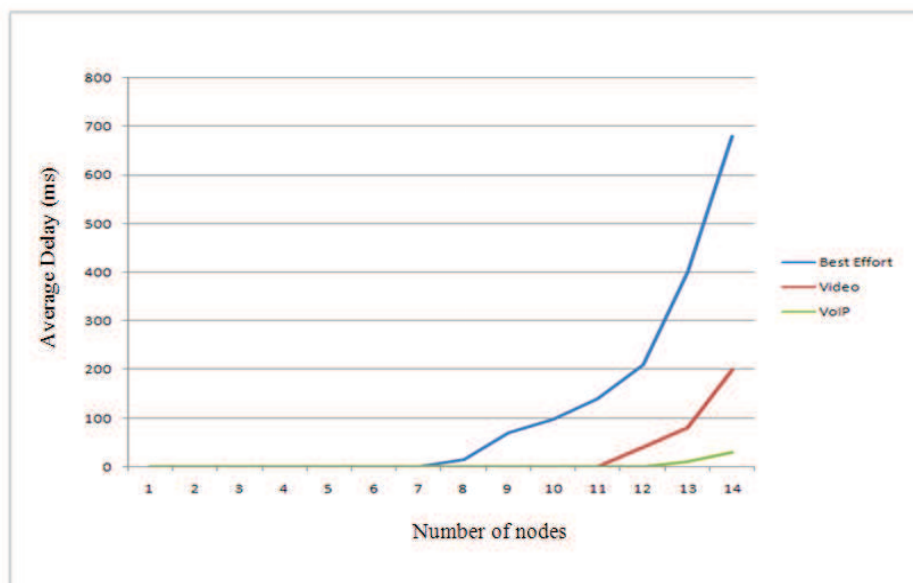


Figure 4.5. Simulation de délai en utilisant le Q-CBRP avec la couche MAC changée

Nous remarquons sur la *Figure 4.4*, que lorsque le nombre de nœuds est entre 0 et 6, le délai est insignifiant (de l'ordre de quelques millisecondes), donc le CH est à son maximum de performance. Par contre à 6 nœuds, le flux Best effort commence à croître alors que les flux vidéo et voix restent encore négligeables, car le CH renvoie les flux vidéo et voix et laisse en attente le trafic Best effort, ce qui explique cette augmentation.

Dès que le nombre de clients dépasse les 6, nous remarquons l'efficacité de la différenciation de service. Le CH traite les flux contenant la voix prioritairement par rapport à la vidéo en premier et le Best effort en dernier, ce qui explique le délai garanti du trafic voix et vidéo par rapport au flux Best effort.

Dans la *Figure 4.5*, avec nos modifications des paramètres de contention de la sous couche MAC, en comparaison avec la *Figure 4.4*, dès que le nombre de clients est égale à 7, le flux Best effort est dégradé, par contre l'amélioration est très nette au niveau des flux voix et vidéo.

#### 4.8. CONCLUSION

Dans notre deuxième contribution, nous avons utilisé notre algorithme développé Q-CBRP, en y ajoutant les mécanismes de QoS proposés par le standard 80.11e, dont nous avons modifié les valeurs des paramètres de contention et en mettant le point sur l'utilisation effective de la valeur TXOP. Nous avons montré l'impact positif de fusion entre deux



couches protocolaires pour augmenter la robustesse, l'efficacité en termes de QoS de notre réseau étudié.

Nous avons remarqué aussi qu'en modifiant les paramètres standards d'une couche, le réseau se comporte d'une manière plus efficace.

Finalement l'objectif fixé dans cette thèse concernant le transport multimédia via le wifi maillé, a été concrétisé par un routage efficace (Q-CBRP) nécessaire pour avoir un réseau souple et réactif aux changements fréquents de topologie, mais également par l'optimisation des paramètres de la couche deux ayant un impact plus important.

## **i. CONCLUSION**

Actuellement, les réseaux IEEE 802.11s sont considérés comme une alternative sérieuse aux réseaux tout filaires pour l'accès à l'Internet. En effet, les nombreux avantages qu'offre cette technologie (rapidité de déploiement, réduction des coûts d'installation, mobilité, grande couverture, etc.) lui ont permis de s'imposer rapidement sur le marché. Ce monopole est conforté à la fois par l'augmentation continue du débit théorique de ces réseaux mais aussi par l'intégration d'une interface de communication 802.11 dans un large panel d'équipements (webcam, disque dur externe, casque audio, etc.) et de terminaux (téléphone mobile, PDA, lap top, etc.). Dans le contexte de la convergence de réseaux et de services vers le tout-IP, les réseaux d'accès 802.11 n'échappent pas à cette mouvance et sont de plus en plus sollicités pour la transmission de services IP, de voix et de vidéo, très exigeants en termes de qualité de service (QoS).

Si la QoS dans le cœur du réseau IP a été largement explorée durant ces dernières années, la QoS dans les réseaux d'accès n'a pas donné entière satisfaction et donc elle reste une thématique encore ouverte. La maîtrise de la QoS dans les réseaux d'accès de type 802.11s nécessite une bonne compréhension des mécanismes d'accès, de leurs spécifications et de leurs performances. Cette compréhension constitue la clé permettant de guider le réseau à assurer la performance désirée pour le support des applications temps réel et multimédia. Partant de cette compréhension, les travaux de cette thèse se sont focalisés sur la proposition d'un algorithme de routage efficace et garantissant la QoS aux flux, jumelée d'un mécanisme de couche deux pour la maîtrise de la QoS pour les applications multimédia et temps réel dans les réseaux d'accès de type 802.11s.

Dans ce qui suit, nous résumons les principales contributions qui ont menées à bien dans cette thèse et, enfin, nous introduisons quelques perspectives intéressantes qui peuvent être explorées dans de futurs travaux.

## **ii. PRINCIPALES CONTRIBUTIONS**

L'objectif que nous nous sommes fixés dans cette thèse est la garantie de la QoS dans les réseaux 802.11s. Pour atteindre cet objectif et après l'étude et l'analyse de l'état de l'art, un ensemble de verrous ont été identifiés. L'ensemble de solutions que nous avons proposées pour lever ces verrous constituent les principales contributions de cette thèse.

Nos contributions sont comme suit :

- Etat de l'art des protocoles de routage spécifiques aux réseaux ad hoc, MANET et WMN: nous sommes arrivés à la conclusion que les protocoles en Clustering sont les plus intéressants pour notre étude (chapitre II).
  - Parmi les protocoles étudiés, nous avons procédé à un deuxième choix en fonction des protocoles de routage garantissant une QoS.
  - Etat de l'art sur les mécanismes de QoS au niveau de la sous couche MAC, spécifiques au réseau maillé.
  - Etat de l'art sur les mécanismes de QoS au niveau de la couche physique, spécifiques au réseau maillé.
  - Extension d'un protocole en Clustering de l'état de l'art, dans le but de l'adapter au réseau 802.11s, d'améliorer le délai de bout en bout du réseau, d'offrir une scalabilité bien meilleure par rapport aux protocoles existants et enfin de réduire la bande passante utilisée, tout en préservant un fonctionnement simple du réseau, avec un équilibrage des charges entre ses nœuds.
  - Validation de notre proposition par une simulation sous NS2.
  - Validation de notre proposition accompagnée d'un mécanisme garantissant la QoS proposé par le standard 802.11e, à travers l'utilisation effective du paramètre TXOP et l'adaptation des paramètres de contention CWmin, CWmax et l'AIFSN au réseau maillé, par une simulation sous NS2.
  - Les résultats de nos travaux de recherche ont été discutés dans différentes conférences, puis publiés dans des journaux internationaux.
- 1- Chems eddine BEMMOUSSAT, Fedoua DIDI, Mohamed FEHAM « A survey on QoS in wireless mesh network» MESH 2012: The Fifth International Conference on Advances in Mesh Networks, Italy, 2012.
  - 2- Chems eddine BEMMOUSSAT, Fedoua DIDI, Mohamed FEHAM «Efficient routing protocol to support QoS in wireless mesh network» International Journal of Wireless & Mobile Networks (IJWMN) Vol. 4, No. 5, October, 2012.
  - 3- Chems eddine BEMMOUSSAT, Fedoua DIDI, Mohamed FEHAM «On the support of multimedia applications over wireless mesh networks» International Journal of Wireless & Mobile Networks (IJWMN) Vol. 5, No. 2, April 2013.
  - 4- Chems eddine BEMMOUSSAT, Fedoua DIDI, Mohamed FEHAM « A survey on end-to-end studies of QoS in wireless mesh network» to appear in IJCNC, Novembre

- 5- Chems eddine BEMMOUSSAT, Fedoua DIDI, Mohamed FEHAM «Cluster Based Routing Protocol in Wireless Mesh Network» International Conference on Computer Applications Technology “ICCAT”, Tunisie, in IEEE process 2013.
- 6- Chems eddine BEMMOUSSAT, Fedoua DIDI, Mohamed FEHAM « To Transport multimedia traffic in Wireless Mesh Networks (802.11s) » Journées Nationales des Communications dans les Transports, Nevers-France, 2013
- 7- Chems eddine BEMMOUSSAT, Fedoua DIDI, Mohamed FEHAM « Mac layer to ensure QoS in Wireless Mesh Networks» / Soumis

### iii. PERSPECTIVES

Les travaux réalisés durant cette thèse et les résultats obtenus ouvrent la porte vers un ensemble de perspectives. Parmi celles-ci, nous pouvons citer :

- L’approfondissement de notre étude afin d’améliorer les résultats obtenus. Dans le premier volet de cette thèse, nous avons proposé un algorithme de routage efficace pour les réseaux maillés. Nous avons considéré que les routeurs maillés sont totalement fixes et alimentés, l’actualité des recherches sur ces types de réseau consiste à préserver l’énergie au niveau des routeurs maillés pour des raisons purement environnementales. Donc il sera très intéressant de prendre le facteur énergie comme paramètre d’optimisation.
- Le logiciel NS2 nous a permis de simuler nos contributions dans un réseau wifi maillé qui se rassemble le maximum au réseau réel, grâce à nos paramétrages des routeurs et des clients maillés, mais malgré ces efforts, il reste loin du vrai réseau 802.11s. Un nouveau simulateur des réseaux NS3 qui a vu le jour et qui contient déjà le package 802.11s intégré; pour cela il est intéressant de reprendre nos protocoles sur NS3 pour valider nos résultats et aussi d’avoir un réseau maillé grande échelle (au delà de 1000 nœuds).
- Bien que les mécanismes de la sous couche MAC ont amélioré les performances obtenues par le protocole de routage, mais si nous poussons encore plus loin nos investigations jusqu’à la couche physique, comme nous l’avons vu plusieurs techniques sont disponibles (comme le système MIMO, les antennes intelligentes ou même l’emploi d’un traitement de signal efficace pour l’envoi des données sur le canal partagé). L’intégration de ces mécanismes, en plus de ceux de la sous couche MAC à

un algorithme de routage efficace, pourraient donner des résultats imprévisibles, qu'il serait intéressant de vérifier au travers de simulations.

- Dans le prolongement des travaux de cette thèse, il est intéressant d'appliquer les connaissances acquises, pour déployer un réseau réel de télésurveillance.
- Le réseau Wifi Mesh pourrait aussi être une très bonne alternative aux réseaux véhiculaires VANET, chose que nous souhaitons investir dans nos futurs travaux.

## Annexe

### La Simulation

La simulation peut être définie comme le processus de conception d'un modèle pour un système réel, et la réalisation d'expérimentations avec ce modèle. La simulation est l'approche la plus utilisée dans l'évaluation des protocoles de communication dans les réseaux ad-hoc. Cela est justifié par [70] :

La limitation de l'approche analytique : même si l'étude analytique des protocoles de communication dans les réseaux ad-hoc donne un aperçu sur les propriétés de ces derniers, mais les résultats obtenus restent limités car les études sont basées sur des hypothèses strictes (aucune mobilité, mécanismes MAC parfaits, etc).

Le coût élevé d'expérimentations avec des implémentations réelles : il est très coûteux de déployer des réseaux uniquement pour des objectifs de recherche. De plus, il est plus facile et moins coûteux de mener un grand nombre de tests par des simulations.

### Utilisation des modèles de mobilité sous NS2

L'étude des performances des protocoles de routage dans les réseaux mobiles en générale comme MANET est une étape essentielle dans leur conception. Comme des implémentations réelles des MANETs sont rares, il est difficile de collecter des traces de mouvements réels. L'approche commune est l'utilisation de modèles synthétiques dans les simulations.

Les modèles de mobilité utilisés doivent selon la référence :

- Refléter le mouvement réel des utilisateurs : vu la variété des applications possibles des réseaux mobiles comme le 802.11s, MANET, les scénarios de mobilité à considérer sont nombreux. Ils varient du mouvement des étudiants dans les campus universitaires au mouvement des véhicules sur les routes, et du mouvement des groupes de touristes dans un milieu urbain au mouvement des groupes de sauvetage dans des zones sinistrées. Bien évidemment, il est impossible de concevoir un modèle de mobilité pour tous ces scénarios, mais un modèle doit au moins être représentatif d'un de ces derniers.
- Etre simples à simuler et à analyser : un modèle de mobilité doit être suffisamment simple pour que le temps de la simulation reste raisonnable et pour faciliter l'analyse des résultats. Cependant, pour que le modèle soit réaliste, il doit inclure le maximum de détails, ce qui augmente sa complexité. De ce fait, un modèle synthétique doit trouver un compromis entre ces deux critères en omettant quelques détails.

Les modèles de mobilité les plus utilisés dans les simulations sont :

- RWP (Random WayPoint) : RWP a été utilisé pour la première fois dans [71], pour l'évaluation du protocole du routage DSR. Actuellement, il est le modèle le plus utilisé [72]. Dans RWP, chaque nœud reste dans une même position pendant une période de temps dite de pause. Dès l'expiration de durée de la pause, le nœud choisit aléatoirement une destination et une vitesse et commence à se déplacer. Une fois il arrive à sa destination, le nœud s'arrête et recommence le même procédé.

- RPGM (Reference Point Group Mobility) : il est communément utilisé pour la simulation des scénarios de mobilité synchronisée en groupes. Dans RPGM, chaque groupe possède son propre scénario de mobilité. Le mouvement du centre de chaque groupe suit le modèle RWP et chaque nœud dans un groupe poursuit le centre du groupe. Le trajet du groupe est explicitement défini par une séquence de positions par lesquelles doit passer le centre du groupe [72].
- Manhattan Grid : [72] ce modèle est proposé pour modéliser le mouvement des nœuds sur les routes d'un segment d'une ville. Initialement, une carte composée de routes horizontales et verticales est générée. Les nœuds peuvent se déplacer sur une route dans les deux sens. Quand un nœud arrive à un point d'intersection il peut soit continuer dans la même direction ou tourner à gauche ou à droite.

☞ Ouvrir la fenêtre « Terminal »

☞ Accéder au dossier ns-allinone-2.34/ns-2.34/indep-utils/cmu-scen-gen/setdest

☞ Ecrire la ligne de commande suivante : ./setdest -v <version n°2> -n <nombre de nœuds> -s <type de vitesse> -m <vitesse min> -M <vitesse max> -t <temps de simulation> -P <type de pause > -p <temps de pause> -x <max X> -y <max Y> <nom du fichier>

☞ Exemple :

```
./setdest -v 2 -n 30 -s 1 -m 1 -M 20 -t 100 -P 1 -p 5 -x 1000 -y 1000 > rwm1200x1000x30
```

Un fichier de modèle de mobilité sera créé dans le dossier en cours.

☞ Copier ce fichier dans le dossier ns-allinone-2.34/ns-2.34/tcl/mobility/scene qui contient généralement les fichiers de modèles de mobilité.

Ce fichier sera utilisé dans le programme principal de simulation comme suit :

```
set val(sc) "../ns-allinone-2.34/ns-2.34/tcl/mobility/scene/rwm1200x1000x30"
```

☞ Puis lancer ce modèle dans le corps de programme

```
source $val(sc)
for {set i 0} {$i < $val(nn)} {incr i} {
    $node_($i) start
}
```

## Utilisation des modèles de trafic sous NS2

NS2 permet de générer trois modèles de trafic :

- *CBR (Constat Bit Rate)* : envoie des paquets de taille fixe à un débit donné.
- *Exponentiel* : envoie des paquets de taille fixe par rafale à un débit moyen.
- *FTP (File Transfer Protocol)* : simule l'envoi de données en continue et en grande quantité.

Comme exemple, pour utiliser le générateur de trafic CBR, le fichier cbrgen.tcl qui se trouve sous ns/indep-utils/CMU-scen-gen/ peut générer des connexions TCP et CBR respectivement. En suivant les étapes suivantes :

☞ Ouvrir la fenêtre « terminal »

☞ Accéder au dossier ns-allinone-2.34/ns-2.34/indep-utils/cmu-scen-gen/



☞ Ecrire la ligne de commande suivante : ns cbrgen.tcl [-type cbr ou tcp] [-nn nombre de nœuds] [-seed graine pour le générateur] [-mc nombre maximum de connections] [-rate vitesse] > nom du fichier.

☞ Exemple :

```
ns cbrgen.tcl -type cbr -nn 30 -seed 1.0 -mc 50 -rate 4.0 > cbr1200x1000x30
```

Ce fichier sera utilisé dans le programme principal de simulation comme suit :

☞ Dans la partie définition des options, donner le chemin d'accès pour ce fichier

```
set val(cp)                "../ns-allinone-2.34/ns-2.34/tcl/mobility/scene/cbr1200x1000x30"
```

☞ Puis lancer ce modèle dans le corps du programme

```
source $val(cp)
for {set i 0} {$i < $val(nn)} {incr i} {
    $node_($i) start
}
```

## Glossaire et Traductions

<b>Assignment</b>	Affectation
<b>Backbone WMN</b>	Réseau fédérateur maillé sans fil
<b>Gateway</b>	Passerelle
<b>Cluster</b>	Groupe
<b>Custer-head</b>	Chef de groupe
<b>Handoff</b>	Trafic en relève
<b>Medium Access Reservation</b>	L'accès au medium est avec réservation
<b>Medium</b>	Média de transmission
<b>Mesh Client</b>	Client maillé
<b>Mesh Router</b>	Routeur maillé
<b>Route Discovery</b>	La découverte d'une route
<b>Routing loop</b>	Boucle de routage
<b>Software QoS</b>	QoS logiciel
<b>Time-slots</b>	Tranches de temps
<b>Transmission range</b>	Portée de la transmission
<b>WMN</b>	Réseau maillé sans fil

## Liste des Sigles et Abréviations

<b>AC</b>	Access Category
<b>AP</b>	Access Point
<b>AIFS</b>	Arbitration IFS
<b>ATM</b>	Asynchronous Transfer Mode
<b>AODV</b>	Ad hoc On Demand Distance Vector routing protocol
<b>CA</b>	Contention Access
<b>CBR</b>	Constant Bit Rate
<b>CH</b>	Cluster Head
<b>CSMA/CA</b>	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
<b>CTS</b>	Clear-To-Send
<b>CW</b>	Contention Window
<b>DCF</b>	Distributed Coordination Function
<b>DiffServ</b>	Differentiated Services
<b>DSDV</b>	Distance Source Distance Vector routing protocol
<b>EDCA</b>	Enhanced Distribution Channel Access
<b>FTP</b>	File Transfer Protocol
<b>HTTP</b>	Hypertext Transfer Protocol Secure
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<b>IETF</b>	Internet Engineering Task Force
<b>IFS</b>	Inter Frame Space
<b>IntServ</b>	Integrated Services
<b>IP</b>	Internet Protocol
<b>MAC</b>	Medium Access Control
<b>MANET</b>	Mobile Ad hoc Network
<b>MC</b>	Mesh Client
<b>MR</b>	Mesh Router
<b>MPR</b>	Multi-Points relays
<b>NAV</b>	Network Allocation vector
<b>NS-2</b>	Network Simulator-2
<b>OLSR</b>	Optimized Link State Routing
<b>OSI</b>	Open Systems Interconnexion
<b>PCF</b>	Point Coordination Function
<b>PHY</b>	PHYSical layer
<b>PIFS</b>	PCF IFS
<b>QoS</b>	Quality of Service
<b>SIFS</b>	Short IFS
<b>RREQ</b>	Route REQuest
<b>RSVP</b>	Resource ReSerVation Protocol
<b>RTS</b>	Request-To-Send
<b>TC</b>	Topology Control
<b>TCP</b>	Transmission Control Protocol
<b>ToXP</b>	Transmission Opportunity

<b>UDP</b>	User Datagram Protocol
<b>VoIP</b>	Voice over IP
<b>WiFi</b>	Wireless Fidelity
<b>WMN</b>	Wireless Mesh Network

## REFERENCES

- [1] george aggelo « wireless mesh networking with 802.16, 802.11 and zigbee » Livre : McGRAW-HILL communication, 2009
- [2] fedoua didi « qualité de service dans les réseaux locaux sans fil de type ieee 802.11 » Thèse de doctorat d'état en Télécommunication, Université de Tlemcen, 2010.
- [3] ian f. akyildiz, dr xudongwang , “ wireless mesh networks”, livre, WILEY , 2009
- [4] k.k leung « spinger wireless mesh networks,architecture and protocols » Livre : Springer, 2008
- [5] houda labiod, houssam afifi, costantino de santis “wi-fi, bluetooth, zigbee and wimax” Livre : Springer, 2010.
- [6] rabah fethi « etude des performances des protocoles de routage dans le wifi mesh », Master en télécommunication, l'université de Tlemcen, 2011
- [7] b.dienta & m.taro « mise en place d'un réseau wi-fi expérimentale sécurisé » Ingénieure d'état en télécommunication, Institut d'Oran, 2008
- [8] eugen borcoci « wireless mesh networks technologies: architectures, protocols, resource management and applications » INFOWARE Conference, IARIA, 2011.
- [9] QoS Forum. QoS protocols and architectures. White paper of QoS Forum, <http://www.qosforum.com>, 1999.
- [10] crawley, e., r. nair, b. rajagopalan and h. sandick, "a framework for qos-based routing in the internet", RFC Editor, 1998.
- [11] xiaohua, xu shaojie, tang xufei, mao xiang-yang li, “distributed gateway placement for cost minimization in wireless mesh network” International Conference on Distributed Computing Systems. 2010.
- [12] anna zakrzewska, leszek koszalka, iwona pozniak-koszalka, andrzej kasprzak, “analysis of routing protocol performance in wireless mesh networks”, International Conference of Computational Science and Its Applications, 2010.
- [13] c. perkins and p. bhagwat, “ highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (dsv) for mobile computers”, Proc. Of SIGCOMM'94, 1994
- [14] A. Kasprzak,, Topological Design of the Wide Area Networks, WUT Press, Wroclaw, 2001
- [15] m. bahr, j. wang, and x. jia, “routing in wireless mesh networks”, in: wireless mesh networking: architectures, protocols and standards. (eds.) Zhang Y., Luo J., Hu H., Auerbach, 2006
- [16] t. h. clausen and p. jacquet, optimized link state routing protocol (olsr), ietf experimental. RFC 362, 2003
- [17] c. perkins, “ ad hoc on-demand distance vector (aodv) routing, rfc3561, 2003
- [18] d. johnson, “the dynamic source routing protocol (dsr) for mobile ad hoc networks for ipv4, RFC4728, 2007
- [19] s. siva nageswara rao, y. k. sundara krishna, and k.nageswara rao “a survey: routing protocols for wireless mesh networks” International Journal of Research and Reviews in Wireless Sensor Networks. 2011
- [20] yong zhang, yifei wei, mei song, junde song “r-aodv rate aware routing protocol for wifi mesh network” ICWMMN2006 Proceedings. 2006

- [21] bhupendra kumar gupta and b.m.acharya manoj kumar mishra “optimization of routing algorithm in wireless mesh network” IEEE, 2009
- [22] jaydip sen “a throughput optimizing routing protocol for wireless mesh networks”. 12th IEEE International Conference on High Performance Computing and Communications.2010.
- [23] rainer baumann, simon heimlicher, vincent lenders, martin may “routing packets into wireless mesh networks” Third IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob 2007).
- [24] chungui liu, yantai shu and lianfang zhang, maode ma “backup routing for multimedia transmissions over mesh networks” IEEE 2007
- [25] jaydip sen “efficient routing anomaly detection in wireless mesh networks” First International Conference on Integrated Intelligent Computing.2010.
- [26] tiejun chen, shuang xu “algorithm for congestion control in wireless mesh network”, WASE International Conference on Information Engineering, 2010
- [27] m. iqbal, x. wang, s. li, t. ellis “qos scheme for multimedia multicast communications over wireless mesh networks” IET Communications, 2009
- [28] mukesh kumar “comparative analyses of cbrp, dsr, aodv routing protocol in manet” International Journal on Computer Science and Engineering.2010
- [29] mathilde benveniste “a distributed qos mac protocol for wireless mesh” The Second International Conference on Sensor Technologies and Applications, 2008.
- [30] kwan-wu chin, sieteng soh, chen meng, “ a novel spatial tdma scheduler for concurrent transmit receive wmn” 24th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications, 2010.
- [31] vishnu navda, anand kashyap, samrat ganguly and rauf izmailov “ real time video stream aggregation in wireless mesh networks” IEEE 2010.
- [32] roberto riggio, karina gomez and tinku rasheed “on the support of multimedia applications over wireless mesh network” IEEE 2009.
- [33] n. h. moleme, m.a. odhiambo, a.m. kurien, “enhancing video streaming in 802.11 wireless mesh networks using two-layer mechanism solution” IEEE 2009.
- [34] mauro leoncini, paolo santi, paolo valente,“an stdma-based framework for qos provisioning in wireless mesh network”, IEEE 2008.
- [35] chungui liu, yantai shu and lianfang zhang « backup routing for multimedia transmissions over mesh networks” IEEE,2007
- [36] dalei wu, haiyan lu, song ci, haohong wang, and aggelos katsaggelos “quality-driven optimization for content-aware real-time video streaming in wireless mesh networks » IEEE, 2008
- [37] tanghuai fan, lizhong xu, xuewu zhang and huibin wang, “a study of end to end video robust transmission via wmn”, IEEE 2009
- [38] zhuyan zhao, jianhong mu, hao guan, “characterizing the end-to-end throughput in wmn using multiple directional antennas” IEEE 2010.
- [39] xiaohua, xu shaojie, tang xufei, mao xiang-yang li, “distributed gateway placement for cost minimization in wireless mesh network” International Conference on Distributed Computing Systems.2010.
- [40] geeta tripathi, prof. dr. n. g. bawane,” gateways and performance of wmn” 2nd International Conference on Education Technology and Computer (ICETC).2010
- [41] chemseddine bemmaoussat, fedoua didi, mohamed feham « a survey on end-to-end studies of qos in wireless mesh network » to appear in IJCNC, 2013
- [42] chemseddine bemmaoussat, fedoua didi, mohamed feham « a survey on qos in wireless mesh network” MESH 2012 : The Fifth International Conference on Advances in Mesh Networks,Italy,2012

- [43] mahseur mohammed « routage dans les réseaux maillés sans fil » Magister en informatique a l'université de Boumerdès. Algérie.2011
- [44] e.cizeron « routage multi chemins et codage à description multiple dans les réseaux ad-hoc » thèse de doctorat de l'université de Nante. France 2009.
- [45] rémi soulage « contribution a l'étude et a l'amélioration de la qualité de services sur un réseau maillé sans fil wifi » Thèse de doctorat en informatique à l'université de Montpellier2. France.2011
- [46] jihene rezgui « gestion adaptative des ressources dans les réseaux maillés sans fil à multiples-radios multiples-canaux »Thèse de doctorat en informatique à Université de Montréal, 2010
- [47] the 802.11 working group of the ieee 802 committee, “draft amendment for information technology, telecommunication and information exchange between systems, local and metropolitan area networks, specific requirement”, IEEE P802.11sTM/D2.07 January 2009, work in progress.
- [48] m. bahr, “proposed routing for ieee 802.11s wlan mesh networks” 2nd International Wireless Internet Conference (WiCON), Boston, MA, USA, August 2006.
- [49] mohammed a. mahdi and tat-chee wan “performance comparison of manets routing protocols for dense and sparse topology” International Conference on Information and Computer Networks (ICICN 2012).
- [50] skandar basrou « réseaux de capteurs sans fils, état de l'art » TIMA – Micro Nano Systems Group. 2008
- [51] abdelmalik bachir « allongement de la durée de vie des réseaux sans fil de capteurs par l'optimisation des protocoles de routage et d'accès au canal » Thèse de doctorat en informatique, a l'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE, France, 2007
- [52] w. r. heinzelman, a. chandrakasan , and h. balakrishnan, “energy efficient communication protocol for wireless microsensor networks”, Proceeding of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences, IEEE, pp.1-10, 2000.
- [53] s. lindsey, and c. raghavendra, “pegasis: power efficient gathering in sensor information system”, in proc.ieee aerospace conference, vol.3, pp.1125-1130, 2002.
- [54] o. younis, and s. fahmy, “heed: a hybrid energy-efficient distributed clustering approach for ad hoc sensor networks”, IEEE Transactions on Mobile Computing, 3(4): 366-379, 2004.
- [55] a. manjeshwar and d. p. agrawal, “teen : a protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks”. 1st International Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing, San Francisco, CA, April 2001.
- [56] n. v. subramanian, “survey on energy-aware routing and routing protocols for sensor networks”. Technical Report, Computer Science, University of North Carolina, Charlotte. 2004.
- [57] m. jiang, j. li & y. c. tay “cluster based routing protocol (cbrp)” Internet draft, IETF-MANET Working Group. 1999.
- [58] tim daniel hollerung “the cluster-based routing protocol”, project group ‘mobile ad-hoc networks based on wireless lan’,2004
- [59] kamal beydoun « conception d'un protocole de routage hierarchique pour les reseaux de capteurs » Thèse de doctorat en informatique à l'université de FRANCHE-COMTE, France, 2009.



- [60] chems eddine bemmoussat, fedoua didi, mohamed feham «efficient routing protocol to support qos in wireless mesh network » International Journal of Wireless & Mobile Networks (IJWMN) Vol. 4, No. 5, October, 2012.
- [61] chems eddine bemmoussat, fedoua didi, mohamed feham «cluster based routing protocol in wireless mesh network” IEEE process 2013.
- [62] The network simulator, NS version 2; <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [63] The ns Manual; <http://www.isi.edu/nsnam/ns/ns-documentation>.
- [64] m. ergin, m. gruteser, l. luo, d. raychaudhuri, and h. liu, "available bandwidth estimation and admission control for qos routing in wireless mesh networks", Computer Communications, Vol. 31, pp.1301-1317, 2008.
- [65] c. xiaolin., l. xiaoyang, et al, "a control-theoretic approach to improving fairness in dcf based wlans. performance", in Proc. Of IEEE IPCCC, pp.86-93, 2006.
- [66] morad.nehdi, "évaluation du protocole edca", Magister en informatique à l’université de Tunis, Tunisie, 2004.
- [67] c. casetti, chiasserini, "improving fairness and throughput for voice traffic in 802.11e edca" IEEE, in Proc. of IEEE Pimrc, 2004
- [68] IEEE 802.11g, IEEE Standard for Information technology—Specific requirements—Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications—Amendment 4: Further Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band. 2003
- [69] IEEE 802.11b Supplement to 802.11-1999, Wireless LAN MAC and PHY specifications: Higher speed Physical Layer (PHY) extension in the 2.4 GHz band. 1999.
- [70] d. h. cansever, a. m. michelson, and a. h. levesque, "quality of service support in mobile ad-hoc ip networks," in MILCOM, 1999, pp. 30-34.
- [71] s. choi and k. g. shin, "a unified wireless lan architecture for real-time and non-realtime communication services," IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 8, no. 1, pp.44-5, Feb. 2000.
- [72] i. aad and c. castelluccia, "differentiation mechanisms for ieee 802.11," in Infocom, nchorage (Alaska), 2001, pp. 209-218.
- [73] y. kwon, y. fang, and h. latchman, "a novel mac protocol with fast collision resolution or wireless lans," in Infocom, San Francisco, 2003, pp. 793--807.
- [74] w. pattara-atikom, p. krishnamurthy, and s. banerjee, "comparison of distributed fair qos mechanisms in wireless lans," in Globecom, San Francisco, USA, 2003, pp. 553-57.
- [75] j. zhao, z. guo, q. zhang, and w. zhu, "distributed mac adaptation for wlan qos differentiation," in Globecom, San Francisco, USA, 2003, pp. 3442-3446.
- [76] i. aad, q. ni, c. barakat, and t. turletti, "enhancing ieee 802.11 mac in congested environments," in ASWN, Boston, Massachusetts, USA, 2004, pp. 82-91.
- [77] c. wang, b. li, and l. li, "a new collision resolution mechanism to enhance the performance of ieee 802.11 dcf," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 53, n. 4, pp. 1235-1246, Jul. 2004.
- [78] p. chatzimisios, et al., "a simple and effective backoff scheme for the ieee 802.11 mac protocol," in CITSA, Orlando, Florida, 2005.

- [79] s. pollin, a. motamedi, a. bahai, f. cathoor, and l. van der perre, "delay improvement of ieee 802.11 distributed coordination function using size-based scheduling," in ICC, Seoul, Korea, 2005
- [80] j. choi, j. yoo, s. choi, and c. kim, "eba: an enhancement of the ieee 802.11 dcf via distributed reservation," IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 4, no. 4, pp. 378- 390, Jul. 2005.
- [81] i. aad and c. castelluccia, "remarks on per-flow differentiation in ieee 802.11," in EuropeanWireless, Florence, 2002.
- [82] ieee 802.11 wg, draft supplement to standard for telecommunications and information exchange between systems-lan/man specifications requirements - part 11: wireless medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications: medium access control (mac) enhancements for quality of service (qos), ieee 802.11e/draft 5.0, July 2003.
- [83] d. he and c. q. shen, "simulation study of ieee 802.11e edcf," in VTC-spring, Jeju Island, Korea, 2003, pp. 685-689.
- [84] i. tinnirello, g. bianchi, and l. scalia, "performance evaluation of differentiated access mechanisms effectiveness in 802.11 networks," in Globecom, Dallas, Texas, 2004, pp. 3007-3011.
- [85] r. rollet and c. mangin, "ieee 802.11a, 802.11e and hiperlan/2 goodput performance comparison in real radio conditions," in Globecom, San Fransisco, 2003, pp. 724-728.
- [86] d. gu and j. zhang, "evaluation of edcf mechanism for qos in ieee 802.11 wireless networks," in World Wireless Congress (WWC), 2003.
- [87] s. mangold, s. choi, g. r. hiertz, o. klein, and b. walke, "Analysis of IEEE 802.11e for QoS support in wireless LANs," IEEE Wireless Communications, vol. 10, no. 6, pp. 40-50, Dec. 2003.
- [88] t.-c. tsai and m.-j. wu, "an analytical model for ieee 802.11e edca," in ICC, Seoul, 2005, pp. 3474-3478.
- [89] y. xiao, "performance analysis of ieee 802.11e edcf under saturation condition," in ICC, Paris, 2004, pp. 170-174
- [90] y. chen, q.-a. zeng, and d. p. agrawal, "performance analysis of ieee 802.11e enhanced distributed coordination function," in ICON, 2003, pp. 573-578.
- [91] 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, San Francisco, 2003, pp. 1048-1053.
- [92] j. hui and m. devetsikiotis, "designing improved mac packet schedulers for 802.11e wlan," in Globecom, San Fransisco, 2003, pp. 184-189.
- [93] h. zhu and i. chlamtac, "an analytical model for ieee 802.11e edcf differential services," in ICCCN, Dallas, 2003, pp. 163-168.
- [94] w. zhang, j. sun, j. liu, and h.-b. zhang, "performance analysis of ieee 802.11e edca in wireless lans," Journal of Zhejiang University, vol. 8, no. 1, pp. 18-23, Jan. 2007.
- [95] d. vassis and g. kormentzas, "delay performance analysis and evaluation of ieee 802.11e edca in finite load conditions," Wireless Personal Communications, vol. 32, no. 1-2, pp. 29-43, Jul. 2005.
- [96] y. chen, q.-a. zeng, and d. p. agrawal, "performance evaluation for ieee 802.11e enhanced distributed coordination function," Wireless Communications & Mobile Computing vol. 4, no. 6, pp. 639-653, Sep. 2004.
- [97] l. xiong and g. mao, "saturated throughput analysis of ieee 802.11e edca," Computer Networks, vol. 51, no. 11, pp. 3047-3068, Aug. 2007.

- [98] z.-n. 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*, vol. 22, no. 10, pp. 2095-2106, Dec. 2004.
- [99] j. hui and m. devetsikiotis, "a unified model for the performance analysis of ieee 802.11e edca," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 53, no. 9, pp. 1498-1510, Sep. 2005.
- [100] p. e. engelstad and o. n. osterbo, "non-saturation and saturation analysis of ieee 802.11e edca with starvation prediction," in *International symposium on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*, Montreal, Quebec, 2005, pp. 224-233.
- [101] medium access control enhancements for quality of service," *ieee802.11e/d5.0*, working group, 2003.
- [102] ieee 802.11, "wg draft supplement to ieee standard 802.11-1999:
- [103] *ieee p802.11n\_d3.00*, approved draft standard for information technology-telecommunications and information exchange between systems—local and metropolitan area networks--specific requirements-- part 11: wireless lan medium access control (mac) and physic.
- [104] l. zhang and s. zeadally, "harmonica: enhanced qos support with admission control for ieee 802.11 contention-based access," in *RTAS*, Toronto, Canada, 2004, pp. 64-71.
- [105] y. xiao and h. li, "local data control and admission control for qos support in wireless ad hoc networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 53, no. 5, pp. 1558- 1572, Sep. 2004.
- [106] y. xiao, h. li, and s. choi, "protection and guarantee for voice and video traffic in ieee 802.11e wireless lans," in *INFOCOM*, Hong Kong, 2004, pp. 2152-2162.
- [107] a. ksentini, a. gueroui, and m. naimi, "adaptive transmission opportunity with admission control for ieee 802.11e networks," in *MSWIM*, Montreal, Canada, 2005, pp. 234-241.
- [108] j. zhu and a. o. fapojuwo, "a new call admission control method for providing desired throughput and delay performance in ieee802.11e wireless lans," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 6, no. 2, pp. 701-709, Feb. 2007.
- [109] s. oh, j. shin, d. kwak, and c. kim, "a novel call admission control scheme for the ieee 802.11e edca," in *ICACT*, Hyderabad, India, 2008, pp. 1832-1835.
- [110] d. pong and t. moors, "call admission control for ieee 802.11 contention access mechanism," in *Globecom*, San Francisco, USA, 2003, pp. 174-178.
- [111] P. Clifford, K. Duffy, J. Foy, L. Douglas J., and D. Malone, "Modeling 802.11e for data traffic parameter design," in *WiOpt*, Boston, Massachusetts, 2006, pp. 1-10.
- [112] k.-j. noh, w.-y. choi, and s.-k. lee, "adaptive and dynamic tuning of the operation parameter value for qos and fairness in wireless lan," in *VTC - Fall*, Los Angeles, 2004, pp. 4805-4809.
- [113] m. narbutt and m. davis, "experimental tuning of aifsn and cwmin parameters to prioritize voice over data transmission in 802.11e wlan networks," in *IWCMC*, Honolulu, Hawaii, 2007, pp. 140-145.
- [114] m. narbutt and m. davis, "the capability of the edca mechanism to support voice traffic in a mixed voice/data transmission over 802.11e wlans - an experimental investigation," in *LCN*, Zurich, Switzerland, 2007, pp. 463-470.
- [115] l. romdhani and c. bonnet, "performance analysis and optimization of the 802.11e edca transmission opportunity (txop) mechanism," in *WiMob*, New York, USA, 2007, pp. 68-68.

- [116] f. cali, m. conti, and e. gregori, "ieee 802.11 wireless lan: capacity analysis and protocol enhancement," in Infocom, San Francisco, USA, 1998, pp. 142-149.
- [117] i. koutoufides and v. a. siris, "802.11e edca protocol parameterization: a modeling and optimization study," in WoWMoM, Helsinki, Finland, 2007, pp. 1-9.
- [118] chemseddine bemmaoussat, fedoua didi, mohamed feham "on the support of multimedia applications over wireless mesh networks" IJWMN,2013
- [119] m.nafa «optimisation des applications de streaming peer to peer pour des réseaux adhoc mobiles ». Thèse de doctorat de l'université d'Evry-Val-d'Essonne.2009
- [120] s.ziane « une approche inductive dans le routage à optimisation de délai : applications aux réseaux 802.11 ». Thèse de doctorat de l'université de Paris 12 val de Marne 2008.