Gestion dynamique des topologies sans fils

Issam Jabri

▶ **To cite this version:**

Issam Jabri. Gestion dynamique des topologies sans fils. Autre [cs.OH]. Université Henri Poincaré - Nancy 1, 2008. Français. NNT : 2008NAN10062 . tel-01748448

HAL Id: tel-01748448
https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01748448

Submitted on 29 Mar 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4
Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10
http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php
http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm

Nancy-Université
Université Henri Poincaré

ENIS

N° d'ordre 65/2007

U.F.R. Sciences et Techniques Mathématiques, Informatique et Automatique
Ecole Doctorale IAEM Lorraine
Département de Formation Doctorale Automatique

Thèse

Présentée pour l'obtention du titre de

Docteur de l'Université Henri Poincaré, Nancy I

Spécialité Automatique, Traitement du Signal et Génie Informatique

Et

Docteur de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax

Spécialité Ingénierie des Systèmes Informatiques

Par **Issam JABRI**

Gestion dynamique des topologies sans fils

Soutenue publiquement le 08/11/2008 devant le Jury composé de :

Rapporteurs	**Habib YOUSSEF**	Professeur à l'Institut Supérieur d'Informatique et des Techniques de Communication, Hammam Sousse
	Thierry VAL	Professeur à l'Université de Toulouse II le Mirail
Examinateurs	**Mohamed Adel ALIMI**	Professeur à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax
	Nicolas KROMMENACKER	Maitre de conférences à l'Université Henri Poincaré Nancy I
	Salem NASRI	Professeur à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir
	Thierry DIVOUX	Professeur à l'Université Henri Poincaré Nancy I

Centre de Recherche en Automatique de Nancy
Faculté des Sciences, B.P. 239, 54506 Vandœuvre lès Nancy

Table des matières

Introduction générale……..……1

Chapitre 1 Etat de l'art de la qualité de service dans les réseaux IEEE 802.11……..5

1. Introduction…….5
2. La qualité de service……6
    2.1. Généralités sur la qualité de service……6
    2.2. Qualité de service dans les réseaux sans fil……10
    2.2.1 Bluetooth……..11
    2.2.2 Zigbee……...12
    2.2.3 HiperLAN…….13
3. Le standard IEEE 802.11……..15
    3.1. Généralités……..15
    3.2. Modes opératoires……..16
    3.2.1 La fonction de coordination distribuée…….17
    3.2.2 La fonction de coordination centralisée…….....19
4. La qualité de service dans les réseaux IEEE 802.11…….21
    4.1. Problématique de la qualité de service dans les réseaux IEEE 802.11…..21
    4.2. Limites en termes de QoS du standard IEEE 802.11…….22
    4.2.1 Limitations de la méthode d'accès de base DCF…….22
    4.2.2 Limitations de la méthode d'accès PCF……...25
    4.3. Les différentes solutions de qualité de service……...26
    4.3.1 Introduction……..26
    4.3.2 Le nouveau standard IEEE 802.11e…….27
    4.3.2.1 Introduction……...27
    4.3.2.2 La méthode d'accès EDCA……...28
    4.3.2.3 La méthode d'accès HCCA……...31
    4.3.2.4 Améliorations sur la norme IEEE 802.11e……32
    4.3.3 Améliorations basées sur la différentiation des services……..…33
    4.3.4 Améliorations basées sur le contrôle d'erreurs……38
    4.3.5 Autres approches d'amélioration de la qualité de service……39
5. Conclusion…….41
Références…….43

Chapitre 2 Equilibrage de charges pour la gestion de la qualité de service……..47

1. Introduction……...47
2. Motivation……48
    2.1. Etude de situations réelles……..49
    2.2. Synthèse des études sur les situations réelles……52
3. Travaux reliés……53
    3.1. Travaux de Sheu et Al……53
    3.2. Travaux de Papanikos et Logothetis……..54
    3.3. Travaux de Hsiao et Al……..55
    3.4. Travaux de Balachandran et Al……..55
    3.5. Travaux de Bajerano et Al……..57
    3.6. Travaux de Raniwala et Chiueh……58
    3.7. Travaux de Brickley et Al……..59
    3.8. Travaux de Tsai et Lien……..59
    3.9. Travaux de Zhao et Al……59
    3.10. Travaux de Velayos et Al……60
    3.11. Propositions industrielles et normalisation……...61
    3.12. Synthèse des travaux reliés……...61
4. Proposition d'un nouvel algorithme d'équilibrage……63
    4.1. Architecture générale de la solution d'équilibrage……64
    4.2. Algorithme d'équilibrage de charge……...66
    4.3. Exemple……..69
    4.4. Amélioration de l'algorithme……72
    4.5. Remarques……..76
5. Conclusion……78
Références……79

Chapitre 3 Protocole d'équilibrage de charge……..…...82

1. Introduction……...82
2. Spécification du protocole……83
    2.1. Joindre un point d'accès dans le standard 802.11……..83
    2.2. Protocole d'équilibrage de charge……..85
3. Exemples de scénarios……..91
4. Validation et simulations du comportement dynamique du système……..……..94
    4.1. Modèle SDL du système d'équilibrage……..96
    4.2. Simulations MSC du système d'équilibrage……..99
5. Adaptation du protocole d'équilibrage au standard 802.11……102
6. Conclusion……..104
Références……...105

Chapitre 4 Evaluation des performances de l'approche d'équilibrage de charge……..108

1. Introduction……108
2. Présentation de l'environnement de simulation OPNET Modeler……..109
3. Simulations et résultats……115
    3.1. Portées des transmissions……115
    3.2. Comparaison de notre approche d'équilibrage de charge par rapport au standard……...117
    3.3. Effet de l'utilisation de l'échange RTS/CTS……128
    3.4. Evaluation des améliorations apportées à notre approche..……..135
4. Synthèse des résultats……..142
5. Conclusion……...143

Références……...145

Conclusions et perspectives……147

Format des trames 802.11…..……151

Glossaire……154

Liste des publications…...……...……..……157

Table des Figures

1.1 Positionnement du standard IEEE 802.11 par rapport au modèle OSI…….15
1.2 Architecture générale d'un réseau IEEE 802.11 en mode infrastructure……..17
1.3 Méthode d'accès DCF (échange RTS/CTS utilisé)……..19
1.4 Fonction de coordination centralisée……20
1.5 Performances du mode DCF en termes de bande passante (Ni, 2004)…….23
1.6 Performances du mode DCF en termes de délais (Ni, 2004)……23
1.7 Bande passante cumulée dans une cellule (Heusse, 2003)……...25
1.8 Quatre files d'accès d'une station améliorée 802.11e……...29
1.9 La contention au canal pendant une période EDCA…….31
1.10 Procédure HCF……32
1.11 Classification des approches de différentiation de services……34
1.12 Méthode d'accès Blackburst..…….35

2.1 Architecture du système d'équilibrage de charges...…….66
2.2 Algorithme d'équilibrage de charges...…….68
2.3 Topologie du réseau public……...69
2.4 Niveau de charge initial des points d'accès……..70
2.5 Charge des APs suite à la première itération……70
2.6 Charge des APs suite à la deuxième itération……...71
2.7 Topologie du réseau public après équilibrage de charges…….72
2.8 Topologie initiale du réseau public……...73
2.9 Charge initiale des APs…….74
2.10 Charge des APs après la deuxième itération……...74
2.11 Charge des APs après la deuxième itération (avec δ=10%)……...75
2.12 Charge des APs après la troisième itération (avec δ=10%)…..……...75

3.1 Structure d'une trame de gestion……..86
3.2 Structure d'un élément d'information……..87

3.3 Structure de la requête Req_Connect……...87
3.4 Structure de la trame Ack_Connect positive……89
3.5 Structure de la trame Ack_Connect (réponse négative)……89
3.6 Structure du champ *Redistributions* de la trame Ack_Connect……90
3.7 Acquittement positif sans recours au serveur……...92
3.8 Acquittement positif avec recours au serveur d'équilibrage de charge.……...93
3.9 Processus de modélisation et simulation SDL et MSC……96
3.10 Modèle SDL d'un processus de gestion de mobile…..……..……..97
3.11 Modèle SDL d'un point d'accès……98
3.12 Le modèle SDL du réseau public sans fils……..98
3.13 Simulation MSC (pas de recours au serveur)……100
3.14 Simulation MSC (recours au serveur)……...101
3.15 Structure de la nouvelle trame d'authentification……102
3.16 Structure de la nouvelle trame : réponse d'authentification……..103

4.1 Modèle hiérarchique d'OPNET……..111
4.2 Workflow de OPNET Modeler……...111
4.3 Modèle *wlan_wkstn* d'OPNET……...112
4.4 Modèle *wlan_station* d'OPNET……..112
4.5 Scénario pour la détermination de la portée des communications……..116
4.6 SNR en fonction de la distance……...116
4.7 Modèle OPNET du réseau public sans fils……119
4.8 Paquets perdus par saturation des buffers des couches supérieures……121
4.9 Paquets perdus par dépassement du seuil de retransmissions……121
4.10 Délai global d'accès au médium……...122
4.11 Bande passante utilisée globale……123
4.12 Délai moyen pour chaque BSS……123
4.13 Gigue moyenne……124
4.14 Rapport Signal sur Bruit……...125
4.15 Délai d'accès au médium M3_Vo……126
4.16 Délai d'accès au médium M6_Vo……126
4.17 Délai d'accès au médium M4_Vi……..127
4.18 Paquets retransmis……127
4.19 Nombre de slots de Backoff……..128
4.20 Bande passante utilisée avec échange RTS/CTS……..129
4.21 Données perdues par saturation des buffers……..130

4.22 Données perdues par dépassement du seuil de retransmissions……130
4.23 Nombre de slots de Backoff de M14..……..131
4.24 Délai d'accès au médium M14……..131
4.25 Paquets perdus par dépassement du seuil de retransmissions M14.……132
4.26 Nombre de retransmissions M6_Vidéo…….132
4.27 Délai d'accès au médium M6_Vidéo……133
4.28 Délai d'accès au médium M3_Voix……..133
4.29 Nombre de paquets retransmis M3_Voix…….134
4.30 Données perdues par saturation des buffers……..136
4.31 Données perdues par dépassement du seuil de retransmission…….136
4.32 Délai global d'accès au médium……...137
4.33 Délai d'accès au médium de la station M16_Vi……...137
4.34 Nombre de slots de Backoff de M16_Vidéo…….138
4.35 Données perdues par saturation des buffers (M16)……...138
4.36 Paquets perdus par dépassement du seuil de retransmissions M16……..139
4.37 Délai d'accès au médium M13……..139
4.38 Données perdues par saturation des buffers M13_Vidéo…….140
4.39 Données perdues par dépassement du seuil de retransmissions M13_Vidéo……...140
4.40 Délai d'accès au médium M8_Vidéo……141

A.1 Format général d'une trame MAC 802.11…….151
A.2 Format générique d'une trame de gestion MAC 802.11……151

Introduction Générale

Les technologies sans fils sont de plus en plus utilisées pour accéder aux réseaux et partager des ressources. Ces technologies répondent essentiellement à un besoin en mobilité des utilisateurs. Le standard IEEE 802.11 est le standard de fait des réseaux sans fils. Actuellement, la technologie 802.11 est déployée pour étendre mais aussi pour remplacer les réseaux filaires. Le nombre de réseaux publics qui utilisent cette technologie, communément nommés hotspots, ne cesse d'augmenter dans le monde entier. Par exemple l'opérateur Français Orange implante en international 60000 hotspots dans 60 pays (http://www.orange-wifi.com/fr/roaming_fr.htm). L'opérateur T-Mobile implante 8888 hotspots aux Etats-Unis (https://selfcare.hotspot.t-mobile.com/locations/viewLocationMap.do). Ces réseaux publics sans fils offrent aux utilisateurs autorisés, la possibilité de se connecter à Internet dans des lieux divers comme les campus universitaires, les centres commerciaux, les aéroports, les gares, les centres de loisirs, les hôpitaux, etc. Simultanément, les applications qui s'exécutent au niveau des utilisateurs de ces réseaux sont de plus en plus variables. Ces applications varient d'applications classiques tel que l'échange de données, le transfert de fichiers ou des applications Web vers des applications multimédias comme la voix sur IP, la vidéo streaming et autres. De plus en plus d'applications exigeantes en termes de qualité de services sont acheminées sur la boucle locale IEEE 802.11. Quand l'application de voix sur IP nécessite des délais de transmission bornés, la transmission de la vidéo nécessite plutôt une large bande passante et un faible taux de perte de paquets.

La méthode d'accès de base du standard 802.11 est la fonction de coordination distribuée DCF (Distributed Coordination Function). Cette méthode n'implémente aucun mécanisme pour garantir la qualité de service nécessaire au déroulement des différents types d'applications. Elle offre un simple service « best effort » sans prise en compte des exigences particulières de chaque application. La connexion d'une station sans fil à un point d'accès ou à un autre ne dépend que de la puissance du signal reçu (rapport signal sur bruit). Dans la norme IEEE 802.11, l'utilisation de la bande passante disponible n'est donc pas optimale. La

méthode d'accès facultative PCF (Point Coordination Function) du standard, initialement conçue pour supporter les applications temps réel, a également montré ses difficultés en termes de support de qualité de service.

Depuis, plusieurs travaux de recherches ont essayé d'apporter la qualité de service nécessaire dans les réseaux 802.11, mais ces travaux restent incompatibles entre eux et difficiles à implémenter. Ces travaux focalisent essentiellement sur les paramètres d'accès au niveau MAC et sur les techniques d'ordonnancement. Dans le cadre de cette thèse, nous présentons une approche plus globale pour apporter la qualité de service nécessaire aux applications exigeantes en termes de débit, délai, gigue, etc. L'approche d'équilibrage de charge que nous proposons, est un mécanisme de gestion dynamique pour l'accès au réseau sans fils. Son principe de base est de distribuer équitablement les charges entre les différents points d'accès du réseau. Ceci permettra d'améliorer les performances globales du réseau sans fil et de garantir un support minimal de qualité de service. Dans le standard 802.11 d'origine, l'opération d'association entre stations et points d'accès est basée uniquement sur le rapport signal sur bruit. Dans cette méthode nous proposons d'effectuer l'opération d'association en se basant en plus sur la bande passante nécessaire à chaque application. Garder des charges équilibrées entre les différents points d'accès du réseau sans fils permettra d'optimiser l'utilisation de la bande passante disponible.

La suite de ce document est présentée comme suit :

- Dans le premier chapitre, nous allons présenter l'état de l'art de la qualité de service dans les réseaux et particulièrement pour les réseaux sans fils. La technologie IEEE 802.11 est présentée ainsi que ses défaillances en termes de support de la qualité de service. Dans ce chapitre, un état de l'art de plusieurs approches d'amélioration de la qualité de service dans les réseaux 802.11 est présenté.
- Dans le deuxième chapitre, nous commençons par présenter notre motivation pour l'adoption d'une nouvelle approche pour la gestion de la qualité de service dans les réseaux 802.11. Un ensemble de travaux utilisant la notion d'équilibrage de charge sont discutés. Dans ce chapitre, nous présentons notre approche d'équilibrage de charge, essentiellement l'algorithme d'équilibrage mis en place pour la distribution des stations sans fils entre les différents points d'accès.
- La mise en place du système d'équilibrage de charge, présenté dans le chapitre précédent, nécessite l'insertion de nouveaux échanges entre les différentes entités du réseau. Les stations doivent exprimer leurs besoins en termes de qualité de service, et recevront des réponses pour s'associer à un point d'accès ou un autre. Dans le

troisième chapitre nous présentons la spécification du protocole d'échanges entre les entités du système d'équilibrage. Le déroulement de ces échanges est présenté sur la base de quelques scénarios. Une vérification formelle et une simulation des échanges avec les outils SDL et MSC sont présentées.

- Dans le chapitre 4, nous présentons l'évaluation de notre approche d'équilibrage par rapport au standard 802.11 d'origine. Nous utilisons l'outil de simulation OPNET pour montrer que cette approche est bénéfique quand à l'amélioration des performances globales du réseau et de la qualité de service perçue par l'ensemble des utilisateurs.

Le manuscrit se termine par une conclusion dans laquelle nous synthétisons les apports de nos travaux et dégageons les perspectives qu'ils suggèrent.

Chapitre 1

Etat de l'art de la qualité de service dans les réseaux IEEE 802.11

1. Introduction

Actuellement, les réseaux locaux sans fils IEEE 802.11 sont de plus en plus utilisés dans la vie quotidienne. Ces réseaux ne sont plus seulement un support à la mobilité des utilisateurs mais représentent aujourd'hui une vraie alternative aux réseaux filaires. Rien qu'en inspectant les nouvelles générations d'ordinateurs portables et d'appareils électroniques des différents constructeurs, nous remarquons qu'ils sont, dans leurs majorité, équipés d'interfaces de réseaux sans fils de la famille IEEE 802.11 (commercialisées sous le nom Wi-Fi). Les espaces publics offrant un accès à Internet à travers la boucle locale 802.11 sont de plus en plus répandus (campus universitaires, hôpitaux, centres commerciaux, gares, aéroports, cafés, restaurants, parcs,…). Simultanément, les applications multimédias sur IP sont très variées et de nouvelles applications ne cessent d'apparaître. Le développement et l'expansion d'une technologie réseau, telle que les réseaux 802.11, sont strictement liés à la qualité de service offerte à ces nouvelles applications. Initialement conçue pour un service Best Effort, plusieurs améliorations ont essayé d'apporter ce niveau de qualité de service nécessaire à cette technologie.

Dans ce chapitre, nous présentons la notion de qualité de service dans les réseaux de communication et particulièrement dans les réseaux sans fils. Dans un deuxième temps, nous aborderons la technologie de réseaux sans fils IEEE 802.11 et les défaillances de cette norme en termes de support de la qualité de service. La suite de ce chapitre sera consacrée à la discussion des différentes solutions de qualité de service apportées à la norme 802.11 notamment le nouvel amendement du standard : IEEE802.11e.

2. La qualité de service

2.1. Généralités sur la qualité de service

L'explosion de l'Internet et la multitude de ses usages ont rapidement fait évoluer les besoins des utilisateurs des réseaux. Si on se place dans les réseaux IP, de nouvelles applications très sensibles aux performances des réseaux ont émergé :

- la téléphonie sur IP : selon les statistiques de l'observatoire des marchés de l'ARCEP (http://www.art-telecom.fr/) au premier trimestre de l'année 2007, Le nombre d'abonnements à un service téléphonique progresse de 4,0% sur un an grâce à l'essor des offres de téléphonie sur IP. Elles représentent 20% des 38,7 millions d'abonnements, soit 7,8 millions ; cette proportion n'était que de 11% au premier trimestre de l'année 2006.
- La diffusion de contenus multimédia : visioconférences, vidéo à la demande, radio en ligne…
- Les jeux en réseaux : ils ont existé dès la naissance des réseaux, mais la puissance de calcul disponible actuellement sur les ordinateurs permet de concevoir des jeux toujours plus gourmands en ressources. Les principaux constructeurs de consoles fournissent aujourd'hui des services de jeu en ligne s'appuyant sur Internet. Le jeu en ligne le plus populaire aujourd'hui rassemblait plus de 5 millions d'abonnés à travers le monde à la fin de l'année 2005 (Chaudet, 2006).

D'autres applications plus anciennes ont été également transférées sur les réseaux IP telles que les fonctions d'administration (contrôle à distance), les applications bancaires ou de bourse, les applications médicales et les applications industrielles.

Avec cette diversité d'applications, il n'est pas facile de donner une définition globale de la qualité de service. Un utilisateur par exemple voudra tout simplement que le service fonctionne *correctement* alors qu'un autre exigera des performances minimales. Ce terme regroupe des critères différents selon les services, et peut parfois être subjectif (Campedel, 2005). Par exemple, pour le transfert de fichier, le critère principal de jugement sera la vitesse et la fiabilité. Par contre, pour une visioconférence, il faudra des délais de transmission bornés tout en tolérant un faible taux de perte. Pour la visualisation d'un film, il faudra une bonne définition d'image et une bonne vitesse de rafraîchissement. Dans le cas où l'on souhaiterait effectuer des virements bancaires, on s'intéressera surtout à la fiabilité et la sécurité de la transaction. Pour les jeux en réseaux, une bonne synchronisation entre les machines des différents joueurs est nécessaire. Pour des applications médicales ou industrielles, on

s'intéresse plutôt aux délais maximaux (délais de bout en bout bornés) et à la fiabilité des échanges. On pourrait probablement trouver encore de nombreux critères en énumérant plus d'applications.

Pour cette raison, il n'y a pas une définition exacte de la qualité de service dans la terminologie réseau et nous présenterons ici quelques définitions issues de la littérature. La définition de base de la qualité de service a été donnée dans (ITU-T, 1993) comme étant l'effet collectif de la performance des services, qui détermine le degré de satisfaction d'un utilisateur pour un service. Pour Vogel et Al. (Vogel, 1995), la qualité de service représente l'ensemble des caractéristiques quantitatives et qualitatives d'un système multimédia distribué nécessaire pour assurer les fonctionnalités requises d'une application. Dans (ISO/IEC, 1995) la qualité de service est l'ensemble des qualités reliées au comportement d'un ou plusieurs objets. Pour l'IETF, la qualité de service est un ensemble d'exigences de service devant être remplies par le réseau lors du transport d'un flux. Pour Malamos et Al. (Malamos, 1999), la qualité de service est la mesure de base qui détermine si oui ou non le fonctionnement d'un système répond aux besoins des utilisateurs. Pour Chalmers et Sloman (Chalmers, 1999) : alors que les systèmes sont souvent définis en fonction de leurs fonctionnalités, la qualité de service définit les caractéristiques non fonctionnelles d'un système qui affectent la qualité du résultat perçu par les utilisateurs (qualité de la vidéo pour un spectateur par exemple).

Les besoins en qualité de service de l'utilisateur sont transformés en paramètres technologiques de qualité de service par des outils de gestion de qualité de service. Celle-ci est définie comme étant un ensemble de fonctions et de mécanismes de supervision et de contrôle pour assurer que le niveau de qualité de service recherché est bien mis en place et surtout maintenu (Chalmers, 1999). Deux types de fonctions de gestion de qualité de service sont identifiés : statique et dynamique. Les fonctions de gestion de QoS statiques sont appliquées à l'initialisation du système, alors que les fonctions dynamiques sont appliquées autant que nécessaire durant l'exploitation du système (Chalmers, 1999). Les fonctions statiques et dynamiques de la gestion de QoS sont résumées dans les tableaux suivants.

Tableau 1.1 Fonctions statiques de gestion de QoS (Chalmers, 1999)

Fonction	**Définition**	**Exemple de techniques**
Spécification	Définition des besoins et des capacités de QoS	Besoins à différents niveaux, utilisateur, environnement, technologies, application, etc.
Négociation	Processus pour atteindre une spécification acceptée par	Modification des paramètres après une panne, ces modifications doivent

	tous les partis	considérer les relations établies entre les paramètres et les préférences de l'utilisateur
Contrôle d'admission	Comparaison des besoins en QoS et la capacité d'atteindre ces besoins	Les ressources disponibles peuvent être estimées avec l'aide des informations de réservation et des modèles de performance
Réservation de ressources	Allocation de ressources à des connexions	Les techniques de réservation de ressources en réseau (ex : RSVP)

Tableau 1.2 Fonctions dynamiques de gestion de QoS (Chalmers, 1999)

Fonction	**Définition**	**Exemple de techniques**
Supervision	Mesure de la QoS réellement fournie	Surveillance du paramètre en relation avec la spécification
Contrôle	Assurer que tous les partis adhèrent au contrat de QoS	Contrôle des paramètres qui sont en relation avec le contrat
Maintenance	Modification des paramètres par le système pour maintenir la QoS	Utilisation de filtre, file d'attente pour maintenir le paramètre de délai ou de débit
Renégociation	Renégociation du contrat	Nécessaire lorsque les fonctions de maintenance de la QoS ne peuvent plus assurer le contrat
Adaptation	L'application s'adapte aux changements en QoS du système, probablement après une renégociation	Techniques d'adaptation au niveau applicatif telle que la diminution du débit de sortie des données si la bande passante diminue
Synchronisation	Combinaison de plusieurs flots multimédia avec des contraintes temporelles de QoS qui nécessite une synchronisation	Il est nécessaire de relier l'information temporelle des deux flots multimédia que l'on veut synchroniser

Si les critères de la qualité de service sont bien définis, il reste à trouver les moyens de les garantir. Il faut pour cela s'appuyer sur plusieurs éléments et savoir procéder à leur intégration au sein d'un modèle général de bout en bout (Campedel, 2005). On trouve des offres

opérateurs clés en main, mais elles prennent en général uniquement en compte le niveau réseau, et concernent juste l'interconnexion entre deux sites, ou la connexion à un autre réseau. Une des difficultés principales de la mise en place de la qualité de service est de réussir une intégration selon deux axes : vertical et horizontal.

- L'intégration verticale consiste à descendre des besoins des utilisateurs vers les ressources physiques. La qualité de service n'est pas reliée à une couche spécifique du modèle OSI : elle nécessite une coordination de l'ensemble des couches du modèle. Il faut effectuer la traduction des besoins, et s'assurer de l'interopérabilité des mécanismes.
- L'intégration horizontale concerne les équipements traversés entre les deux extrémités qui communiquent. On peut ici avoir l'intervention de plusieurs opérateurs, ce qui pose éventuellement des problèmes de négociation, et l'on a probablement une diversité des technologies de QoS mises en œuvre. La traversée du réseau nécessite donc une interopérabilité de celles-ci.

Afin de pouvoir discuter des exigences en termes de qualité de service, établir des contrats et vérifier ensuite si les différentes clauses sont bien respectées, on a besoin de définir des critères précis. Dès que l'on rentre dans des considérations techniques, il est beaucoup plus facile de définir des paramètres et d'être objectif dans leur évaluation, ce qui ne signifie pas que leur mesure soit facile (Campedel, 2005). Les paramètres pertinents peuvent varier selon les environnements et il n'y a pas vraiment de critère universel. Mais les paramètres classiquement associés à la qualité de service dans les réseaux sont : la disponibilité, la bande passante, la latence, la gigue et le taux de perte.

- la disponibilité décrit la fiabilité du réseau et peut être définie comme un rapport entre le temps où la connexion au réseau est disponible et le temps total d'ouverture théorique du service. En particulier, la disponibilité concerne plus que la simple accessibilité au service. Elle concerne plutôt un niveau de service exploitable par l'utilisateur.
- La bande passante est définie comme étant le débit ou la vitesse de transmission des données ou encore le nombre de bits transmis par unité de temps. Elle dépend des supports physiques utilisés et de la capacité de traitement des équipements du réseau traversé.
- Le délai est définit comme étant le temps mis par un paquet (ou une information) pour parcourir le chemin entre une source et une destination. Ce paramètre dépend du

support physique utilisé, du nombre d'équipements traversés sur le chemin entre la source et la destination, de la taille des paquets des protocoles MAC utilisés et du niveau de partage du réseau (congestion,…).

- La gigue est définie comme étant la variation des délais entre les différents paquets d'un même flux. Ce paramètre est assez important dans les applications multimédia et temps réel nécessitant une forte synchronisation entre source et destination.
- Le taux de perte est défini comme le rapport entre le nombre d'octets émis et le nombre d'octets effectivement reçus. Ce paramètre permet d'avoir une idée sur la capacité de la transmission du réseau.

2.2. Qualité de service dans les réseaux sans fils

Les évolutions dans le domaine des communications sans fils et les techniques multimédia ont conduit à un développement considérable d'une nouvelle génération de services multimédia sans fils. Avec le nombre croissant de ces applications et le nombre important de technologies d'accès (IEEE 802.11, Bluetooth, GSM, UMTS, WiMax, UWB, satellites,…), de nouveaux défis sont à remporter quant à la gestion de la qualité de service dans les réseaux sans fils. Actuellement, de nouveaux environnements logiciels permettent à des applications utilisateurs d'accéder aisément à plusieurs services riches et variés à travers un ou plusieurs réseaux d'accès souvent sans fils. Par exemple une application de téléphonie sur le réseau GSM peut basculer sur le réseau WiFi à l'intérieur d'un bâtiment.

Les protocoles et les mécanismes de la qualité de service utilisés dans les environnements filaires ne peuvent pas être appliqués dans les environnements sans fils ou les environnements hybrides filaires/ sans fils. Ceci est dû aux caractéristiques des réseaux sans fils :

- la faible bande passante relative aux réseaux sans fils et les interférences peuvent affecter le support de services multimédia. La capacité du canal de bout en bout est très limitée.
- La nature spécifique du médium radio implique des taux de perte importants ainsi qu'une variation importante de la capacité de ce médium. Ces propriétés entravent la fiabilité des protocoles de gestion de la qualité de service qui reposent sur des échanges explicites de messages de contrôle.
- La nature multi sauts de quelques architectures de réseaux sans fils complique encore plus le partage du canal radio. L'émission d'un flux peut avoir un impact sur tous les autres flux avec lesquels il partage le médium radio, et ce sans que l'un ou l'autre des flux en ait conscience.

- Il est plus difficile de mettre en place des applications temps réel à cause des larges variations des délais et de la gigue.
- La diversité et la complexité des technologies d'accès sans fils donne un nombre important de solutions de QoS. Il sera nécessaire de garantir l'interopérabilité entre ces différentes solutions dans le cas de réseaux hétérogènes.
- La mobilité des utilisateurs sans fils peut avoir un fort impact sur la qualité de service offerte. Une telle mobilité peut impliquer une violation des garanties de qualité de service qui étaient valables au départ. La gestion de la qualité de service doit prendre en compte cette mobilité.

Dans la suite de cette section, nous présentons succinctement les solutions de qualité de service associées aux technologies sans fil Bluetooth, Zigbee et HiperLAN. La technologie IEEE 802.11, objet de notre étude, sera abordée d'une façon plus détaillée dans la suite du chapitre.

2.2.1. Bluetooth

La technologie Bluetooth a été développée à l'origine par Ericsson. Elle fait actuellement l'objet d'une spécification maintenue et développée par le groupe SIG (Special Interest Group) de Bluetooth. L'objectif de cette technologie est de permettre des communications sans fils sur de courtes distances entre plusieurs appareils avec une faible consommation d'énergie. On parle alors de réseaux locaux sans fils WPAN (Wireless Personal Access Network). Cette technologie a été normalisée par l'IEEE sous la référence IEEE 802.15.1. Les applications de cette technologie vont du marché de la téléphonie mobile aux terminaux de paiement par carte bancaire et porte monnaie électronique, en passant par les équipements informatiques. La technologie Bluetooth utilise une des bandes de fréquence ISM[1] 2,4-2,4835 GHz qui présente l'avantage d'être libre au niveau mondial. La version 1.0 offre un débit maximal de 1 Mbps pour une couverture de l'ordre d'une dizaine de mètres. La version 1.2 offre un débit maximal de 2 à 3 Mbps et la version 2.0 permet d'atteindre les débits de 4,6 et 12 Mbps. Pour commencer une communication, un groupe d'équipements doit former une cellule appelée piconet. Une telle cellule comporte un maître et sept esclaves au plus. Plusieurs piconet peuvent se chevaucher pour former un scatternet. Le maître est responsable d'initier la connexion mais aussi de contrôler le trafic des autres esclaves. Il établit sa propre horloge et l'impose aux autres équipements. Deux types de liens sont possibles : les liens

[1] Les bandes ISM (Industrial, Scientific & Medical) peuvent être utilisées librement pour des applications industrielles, scientifiques et médicales. Si elles ne sont pas soumises à des autorisations, elles font toutefois l'objet de réglementations d'usage.

asynchrones sans connexion (Asynchronous Connection Less) et les liens synchrones orientés connexion (Synchronous Connection Oriented). Ces derniers offrent un support de qualité de service permettant des services synchrones et symétriques en mode circuit. Il est bien adapté aux communications temps réel telles que la voix. Avec la version 1.1, le débit utilisateur maximal qui peut être atteint sur un lien asynchrone est de 723,2 Kbps. Dans ce cas un lien de retour de 57,6 Kbps peut encore être supporté. Des débits symétriques compris entre 108 et 433 Kbps sont possibles. Le lien synchrone supporte un lien full-duplex avec un débit utilisateur de 64 Kbps dans chaque direction (Labiod, 2004). Les débits réellement obtenus sont inférieurs à ceux théoriquement annoncés. Dans l'architecture générale de la norme Bluetooth, le protocole de la couche liaison de données L2CAP contrôle les ressources nécessaires pour offrir une qualité de service donnée. Le processus d'établissement d'une connexion L2CAP permet la négociation des paramètres qui influencent la qualité et la fiabilité d'un lien reliant deux unités Bluetooth. Un champ *options* est réservé à cet usage au niveau des paquets *configuration request* et *configuration response*. La spécification du flux comprend les paramètres : type de service, débit de jetons (Octets/seconde), taille du seau de jetons (octets), bande passante maximale (octets/seconde), latence (microsecondes) et variation du délai (microsecondes).

2.2.2 ZigBee

L'objectif de cette technologie, dont l'idée initiale a commencé en 1998, est d'élaborer une solution simple de communication sans fils à faible débit procurant une autonomie d'énergie de plusieurs mois voire de plusieurs années. Cette technologie est définie par la norme IEEE 802.15.4 au niveau des couches physique et MAC. Au dessus de la couche LLC, la ZigBee Alliance (www.zigbee.org) travaille à des spécifications pouvant opérer sur des implémentations 802.15.4 et couvrant les couches réseau, sécurité et application (Stallings, 2005). Les deux couches physiques de type DSSS spécifiées par la norme sont définies dans les bandes 868MHz/915 MHz et la bande de 2.4 GHz permettant des débits respectivement de 20 à 40 Kbps et de 250 Kbps. Les marchés d'utilisation de cette technologie couvrent la domotique, la gestion intégrée et centralisée dans le secteur immobilier, la gestion de l'énergie. Cette technologie est de plus en plus utilisée dans le secteur industriel pour améliorer la fiabilité des systèmes de contrôle de processus industriels, la création de réseaux de supervision pour l'amélioration de la sécurité, l'acquisition automatique des données à partir des capteurs pour réduire et/ou faciliter l'intervention humaine. En effet, elle participe grandement à l'essor du marché des réseaux de capteurs sans fils. ZigBee propose trois

topologies possibles : point à point, où la communication est directe entre deux nœuds, en étoile, où toutes les communications passent par un point central ou coordinateur, et maillée, où il est possible de combiner des topologies en étoile et point à point. Deux méthodes d'accès au canal sont utilisées. Un mode sans coordination, aléatoire basé sur le protocole CSMA/CA sans échange de paquets RTS/CTS et un mode avec coordination. Le mode avec coordination est destiné à supporter la qualité de service nécessaire aux applications temps réel. Ce mode est utilisé uniquement dans les topologies en étoile. Le coordinateur envoie périodiquement des trames balises. Le temps qui s'écoule entre deux trames balises est une supertrame. Dans chaque supertrame, il y a une période d'inactivité au cours de laquelle les nœuds ne peuvent ni émettre ni recevoir. La période d'activité d'une supertrame est partagée en 16 slots de temps. La trame balise, envoyée au cours du premier slot, permet d'annoncer le début de la supertrame et d'indiquer si oui ou non des données sont destinées à l'ensemble des nœuds en attente. La première partie de la période active est une période avec contention où les nœuds utilisent CSMA/CA pour accéder au médium. La deuxième partie est sans contention. Le coordinateur, suite à la demande d'un nœud, peut lui attribuer un ou plusieurs slots GTS (Guaranteed Time Slots) de la période sans contention. Ce mécanisme permet aux nœuds de réserver de la bande passante en fonction de leurs besoins. Cependant, les demandes doivent parvenir au point coordinateur pour être prises en compte, ce qui fait la faiblesse de cette méthode. Si des collisions ont lieu, un nœud est ramené à envoyer plusieurs demandes de GTS avant d'avoir la réservation souhaitée.

2.2.3. HiperLAN (High Performance Local area Network)

L'ETSI (European Telecommunications Standards Institute) a développé deux normes de réseaux locaux sans fils : HiperLAN type 1 et HiperLAN type 2 respectivement en 1996 et 2000. L'objectif était de créer des environnements flexibles de communications à hauts débits permettant des communications point à point. De nos jours, il n'y a pas de produits industriels sur le marché conformes à ces normes. La norme HiperLAN type 1 utilise la bande radio de 5,15-5,30 GHz. Elle offre un débit de communication de 23,5 Mbps pour une portée moyenne d'environ 50m. HiperLAN 1 définit des fonctions d'accès multiple, de routage et de gestion du trafic multimédia. Pour l'accès au médium, HiperLAN1 utilise la technique EY-NPMA (Elimination Yield-Non Preemptive Multiple Access). Cette technique effectue entre autres une gestion de priorité pour assurer la qualité de service requise par les applications. Elle est un mélange de la technique de détection de porteuse CSMA et du signalement actif. Cette technique peut être résumée en 3 étapes :

- une étape de signalement de priorité : permet d'obtenir des performances d'accès hiérarchiquement indépendantes entre les différentes classes de priorité. Elle consiste à envoyer un signal court ne comportant pas de données, appelé burst de signalement. La position du burst dépend du niveau de priorité. Le standard propose cinq positions pour l'envoi de ce burst. La position d'indice 0 est affectée à la priorité la plus haute. La position d'indice 0 est donc la plus proche de la fin de la transmission précédente. Les stations à priorité plus faibles peuvent se rendre compte de l'existence de trafics à plus hautes priorités et s'abstiennent d'émettre.
- une étape d'élimination : cette étape permet de résoudre la contention au canal entre des trafics de même priorité. Suite à la transmission du slot de priorité, les stations continuent leurs transmissions pour une durée aléatoire puis écoutent le canal. S'il est toujours occupé, la ou les stations doivent retarder leurs transmissions. Si le canal est libre, la station peut entrer dans l'étape suivante.
- une étape d'écoute avant transmission : une station en compétition pour l'accès au canal doit encore attendre un intervalle de temps aléatoire avant la transmission effective de son paquet. Durant cet intervalle, si la station détecte une porteuse, elle abandonne la transmission du paquet.

La norme HiperLAN1 propose une solution de support de qualité de service pour les applications multimédia à fortes contraintes temporelles. Une application voulant accéder au réseau doit fournir deux paramètres définissant ses besoins en termes de qualité de service : la durée de vie résiduelle du paquet à émettre (le temps restant à ce paquet pour être délivré par le réseau) et la priorité utilisateur. La gestion du trafic multimédia de HiperLAN consiste à effectuer dans l'ordre les opérations suivantes (Muhlethaler, 2002):

- mise à jour de la durée de vie résiduelle des paquets en attente. Un paquet dont le temps résiduel passe à 0 est éliminé.
- calcul de la priorité d'accès MAC pour les paquets en attente dans un noeud HiperLAN: cette priorité dépend de la priorité utilisateur du paquet en question (les deux valeurs 0 et 1 sont possibles avec 0, la priorité la plus élevée) et du temps résiduel normalisé (temps résiduel du paquet divisé par le nombre de sauts nécessaires pour atteindre la destination). Avec la priorité utilisateur 0, un paquet obtient un niveau supérieur de priorité d'accès MAC à niveau équivalent de temps résiduel normalisé.

- sélection du paquet devant être transmis vers la couche physique : le paquet à envoyer est celui avec le plus petit temps résiduel normalisé parmi ceux qui ont la plus grande priorité utilisateur.

Le système de gestion de trafic multimédia d'HiperLAN 1 permet aussi de gérer des contraintes temps réel dans le cas de réseaux ad hoc multisauts (Muhlethaler, 2002).

L'HiperLAN type 2 permet des communications pouvant s'étendre à des distances de 200m. Cette nouvelle norme permet des interfaces avec différents types de réseaux classiques, tels que TCP/IP, ATM, UMTS ou IEEE 1394. Elle permet par exemple de supporter les applications isochrones et les classes de services correspondant à l'ATM.

3. Le standard IEEE 802.11

3.1 Généralités

Le premier standard international de réseaux locaux sans fils IEEE 802.11 a été écrit par l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) en 1997. Ce standard couvre la couche physique (PHY) et la sous couche de contrôle d'accès au médium (MAC) du modèle de référence OSI. Il devient facile d'interconnecter un réseau local sans fils IEEE 802.11 aux différents standards de réseaux locaux filaires. Ce standard est transparent aux couches supérieures du modèle (Figure 1.1). Les applications utilisateurs peuvent aussi bien s'exécuter sur un réseau local sans fils IEEE 802.11 que sur un réseau filaire 802.3 par exemple. Trois types de couches physiques étaient alors définies dans le standard utilisant soit la technique à étalement de spectre à sauts de fréquences FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum), soit la technique à étalement de spectre à séquence directe DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum), soit l'infrarouge. L'ensemble de ces supports physiques utilisant la même sous couche MAC permettait des débits de 1 à 2 Mbps.

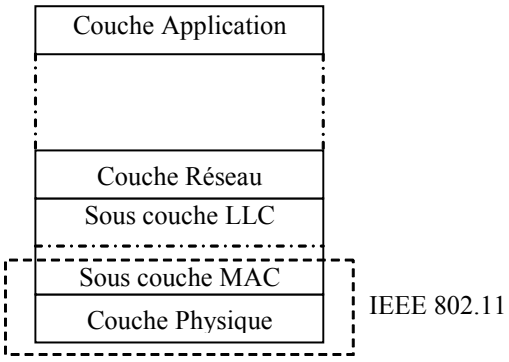

Fig. 1.1: Positionnement du standard IEEE 802.11 par rapport au modèle OSI

D'autres versions du protocole ont été ratifiées en 1999. Les standards IEEE 802.11b (IEEE, 1999) et IEEE 802.11a (IEEE, 1999) définissent une couche physique à hauts débits

respectivement dans les bandes 2,4 et 5 GHz. Le 802.11b permet des débits allant à 11 Mbps au dessus de la couche DSSS. 802.11a, utilise la technologie de multiplexage orthogonal à division de fréquence OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) dans la bande de 5 GHz permettant des débits atteignant 54 Mbps. En 2003, les travaux effectués par le groupe de standardisation ont permis d'améliorer la couche physique de 802.11b pour fonctionner à un débit de 54 Mbps dans la bande de 2,4 GHz, donnant lieu alors au nouveau standard IEEE 802.11g (IEEE, 2001, 2003).

D'autres versions du standard ont vu le jour pour permettre des améliorations au-delà de ceux apportés aux débits physiques. L'IEEE 802.11h (IEEE, 2003) est une amélioration du 802.11a pour la gestion du spectre et des puissances de transmission en Europe. L'amélioration de la sous couche MAC décrite dans la norme IEEE 802.11f (IEEE, 2003) permet de gérer les communications inter points d'accès pour accélérer le déplacement (roaming) des stations sans fils entre des points d'accès de différents constructeurs. Deux nouveaux standards ont été publiés en 2004 apportant des amendements à la sous couche MAC 802.11 : l'IEEE 802.11i (IEEE, 2004) décrit les améliorations au niveau de la sécurité et des mécanismes d'authentification. L'IEEE 802.11e (IEEE, 2004) est le premier supplément dédié à l'amélioration de la qualité de service.

3.2 Modes opératoires

Deux modes de fonctionnement peuvent être utilisés pour la mise en place d'un réseau IEEE 802.11. Dans le mode sans infrastructure ou ad hoc, les utilisateurs communiquent directement entre eux sans aucun intermédiaire (Jabri, 2003). Les stations mobiles se trouvant à la portée les unes des autres forment alors un IBSS ou Independent Basic Service Set. Dans le mode avec infrastructure, toutes les communications, entre les stations mobiles ou entre les stations et le réseau extérieur, passent à travers un point d'accès (AP ou Access Point) qui prend alors le rôle de relais. La zone de couverture d'un AP constitue alors un BSS ou Basic Service Set. Les APs peuvent être reliés ensemble par un système de distribution (DS). Le standard ne donne pas des spécifications particulières sur la nature de cette interconnexion mais il s'agit en général d'un réseau filaire (de type Ethernet). La figure 1.2 illustre l'architecture d'un ESS (Extended Service Set) constitué par un ensemble de BSS reliés par un système de distribution.

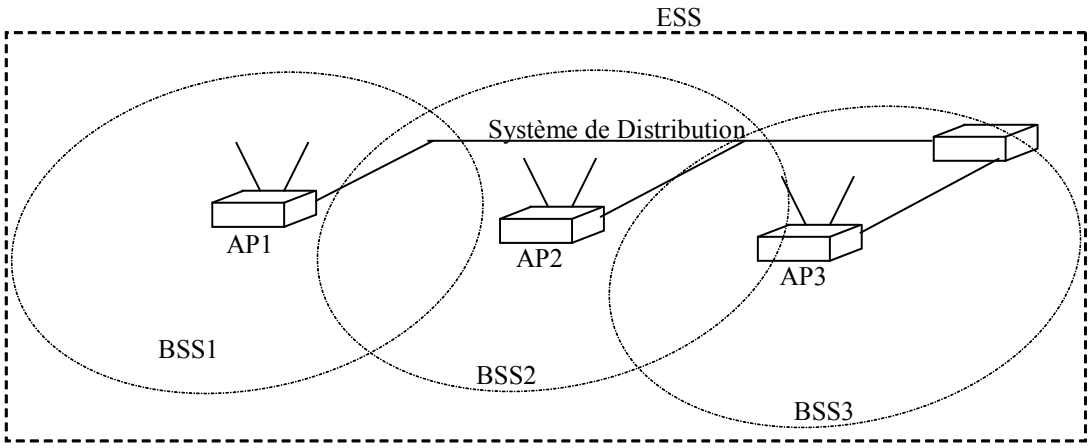

Fig. 1.2 Architecture générale d'un réseau IEEE 802.11 en mode infrastructure

La sous couche MAC IEEE 802.11 définit deux fonctions de coordination d'accès au médium sans fils. Une fonction de coordination distribuée DCF (Distributed Coordination Function) et une fonction de coordination centralisée PCF (Point Coordination Function). DCF est une méthode d'accès asynchrone dont l'implémentation est obligatoire pour tous les équipements IEEE 802.11 fonctionnant en mode avec ou sans infrastructures. PCF, utilisé uniquement en mode avec infrastructure, offre un service synchrone facultatif. L'utilisation de ce service nécessite l'implémentation du mode DCF. PCF est un mode sans contention pour lequel l'accès au médium des différentes stations est coordonné par le point d'accès.

3.2.1 La fonction de coordination distribuée

Le mode DCF est basé sur le protocole CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/ Collision Avoidance). En effet l'utilisation de la méthode CSMA/CD de l'Ethernet est impossible sur un canal radio : une station ne peut pas transmettre et écouter simultanément sur le canal vu les différences significatives des puissances de transmission et d'émission. Pour la signalisation de la bonne réception d'une trame, un mécanisme d'acquittement positif est utilisé dans la méthode CSMA/CA. Chaque fois qu'une trame est correctement reçue, un paquet d'acquittement doit être renvoyé à la source. L'absence de cet acquittement indique un problème dans la transmission de la trame. La trame doit être retransmise.

Dans le mode DCF, chaque station doit écouter le canal avant de commencer la transmission d'un paquet. La sensation physique de la porteuse du canal radio permet d'analyser toute activité sur le canal et de détecter s'il est ou non occupé par d'autres stations. Un temps d'inactivité est obligatoire entre deux trames qui circulent sur le canal radio. Une station qui a écouté le canal et qui a trouvé le canal libre doit attendre un temps inter trame (IFS) avant d'émettre. Si le canal est toujours libre la station peut alors transmettre son paquet. Dans le

mode DCF, ce temps inter trame correspond à un DIFS (DCF IFS) si la station commence une nouvelle transmission, PIFS (PCF IFS) s'il s'agit d'un AP voulant initialiser une période sans contention PCF, et SIFS (Short IFS) si la trame fait partie d'une communication déjà établie.
Le risque de collision, avec la méthode DCF n'est jamais nul. Un mécanisme de backoff est utilisé pour réduire la probabilité d'une collision. Les stations en contention pour l'accès au canal doivent choisir un nombre aléatoire de backoff dans une fenêtre de contention (0, CW). CW (Contention Window) est définit entre CWmin et CWmax. Multiplié par le time slot, ce nombre définit le temps de backoff (*backoff_timer*), intervalle de temps aléatoire pour chacune des stations. CWmin, CWmax et le time slot dépendent de la couche physique utilisée. Les stations décrémentent leurs temps de Backoff chaque fois que le canal est libre. Ce temps est maintenu quand le canal radio devient occupé. Chaque fois que le canal devient libre, chaque station attend un temps DIFS et continue à décrémenter son temps de Backoff. Quand il atteint zéro, la station est autorisée à transmettre. Pour réduire la probabilité de collision, suite à chaque tentative de transmission échouée, la fenêtre de contention CW est doublée dans la limite de la valeur maximale CWmax. Quand la tentative est réussie, la valeur de la fenêtre est réduite à CWmin.
Chaque station peut aussi utiliser un mécanisme de sensation virtuelle de la porteuse en informant toutes les autres stations appartenant au même BSS de la durée prévue pour la transmission de ses trames. Un champ *durée* est alors inclus dans l'entête MAC des trames de données et des trames de contrôle RTS (Request To Send) et CTS (Clear To Send). Les autres stations peuvent ainsi mettre à jour leurs temporisateurs locaux NAV (Network Allocation Vector). L'utilisation de ces deux trames de contrôle RTS et CTS est décrit par le standard mais reste facultatif. Pour diminuer les risques de collision entre deux stations, cachées l'une de l'autre, voulant émettre vers la même destination, on utilise un échange de paquets RTS et CTS entre la source et la destination. Une station voulant émettre transmet d'abord un paquet RTS contenant en plus de l'identité de la source et de la destination la durée prévue de l'échange (réservation du canal pour le premier fragment de l'échange). Toutes les stations, à la portée de la station émettrice, ayant reçu le paquet RTS retarderont leurs transmissions possibles. A la réception de ce paquet, la destination répond par un paquet CTS confirmant la durée restante dans l'échange. Toutes les stations, à la portée de la station destination, ayant reçu le paquet CTS retarderont aussi leurs transmissions possibles. La figure 1.3 illustre la méthode d'accès DCF où l'échange de paquets RTS/CTS est utilisé.

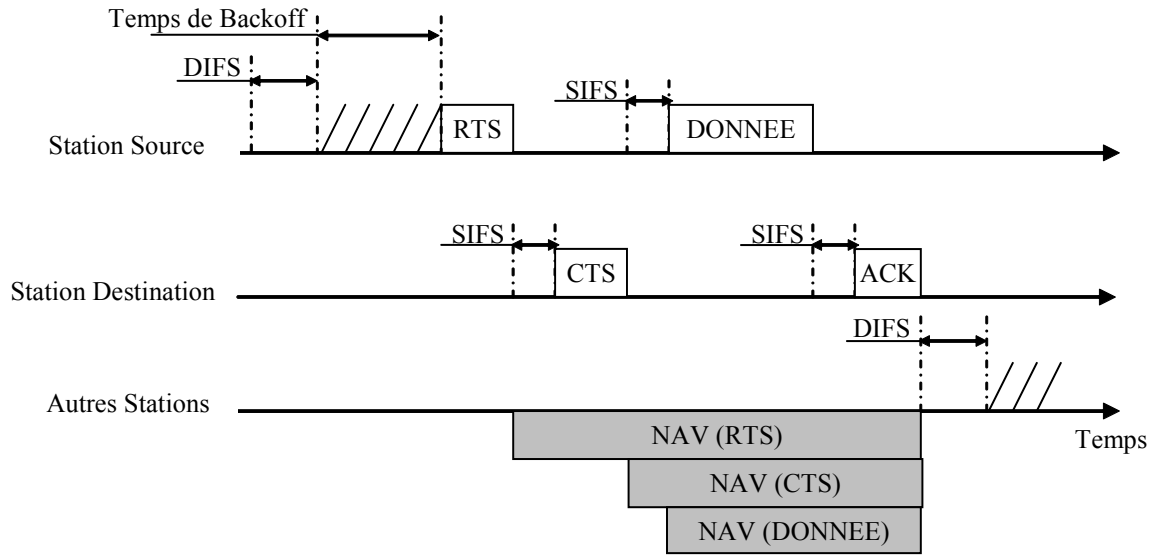

Fig. 1.3 Méthode d'accès DCF (échange RTS/CTS utilisé)

Si une collision se produit, malgré l'utilisation de l'échange RTS/CTS, la perte de la bande passante du canal est minimale grâce à la faible taille de ces paquets (20 et 14 octets) par rapport à une collision se produisant entre deux paquets de données dont la taille maximale peut atteindre jusqu'à 2346 octets (2312 octets, taille maximale du champ de données et 34 octets d'en-tête). L'utilisation de l'échange RTS/CTS quand la taille des trames de données est faible crée par contre une charge supplémentaire lourde sur le canal radio. Pour optimiser l'utilisation de la bande passante de ce canal, le standard a défini un seuil RTS/CTS de la taille des trames de donnée (RTS_Threshold). L'échange RTS/CTS est uniquement utilisé quand la taille des trames de données à transmettre est supérieure à ce seuil. Le standard IEEE 802.11 a défini aussi un seuil de fragmentation (Fragmentation_threshold) représentant une limite maximale de la taille des trames de données. Le choix de ce seuil permet de réduire le risque de collision entre ces trames de données et l'effet d'une collision possible sur la bande passante et le temps d'occupation du canal.

3.2.2 La fonction de coordination centralisée

La deuxième méthode d'accès PCF utilisée pour le contrôle d'accès au médium sans fils est facultative et nécessite la présence d'un coordinateur, généralement le point d'accès. Cette méthode n'est donc valable que dans les réseaux 802.11 avec infrastructure. Les communications directes entre les stations sans fils ne sont plus possibles, elles doivent toutes passer par le point d'accès. De ce fait, la moitié de la bande passante est gaspillée. Cette méthode a été lancée par le standard pour répondre aux besoins des utilisateurs ayant des trafics temps réel. Elle est basée sur la définition d'une période sans contention (Contention

Free Period) qui se déroulera en alternance avec la période avec contention (Contention Period) gérée par le mode DCF. Au sein d'un même BSS, le temps d'accès au canal sera alors partagé en des intervalles (CFP + CP) nommés *Beacon Interval*. Durant la période sans contention, le point d'accès, coordinateur de ce mode PCF, maintient une liste des stations voulant transmettre des données. A tour de rôle le point d'accès consulte les stations pour commencer la transmission de leurs paquets. La durée maximale, CFP_max_duration, de la période sans contention est définie par le point d'accès. Les stations ne sont pas autorisées à envoyer des trames au dessus d'une taille maximale. Une trame de gestion Beacon est envoyée au début de la période CFP à un temps nommé Target Beacon Transmission Time (TBTT). A chaque TBTT, le temps inter trames PIFS alloué aux points d'accès permet à chacun de ces derniers d'accéder au canal, de lancer à chaque fois le mode PCF et d'interdire l'accès en mode DCF des autres stations du BSS. Chaque trame Beacon, diffusée pour l'ensemble des stations du BSS, contient le TBTT de la prochaine période CFP. A la réception de cette trame, les stations n'ayant pas des trafics à envoyer mettent à jour leurs temporisateurs NAV de la durée de la période CFP. La figure 1.4 montre une séquence d'accès au médium sans fils en mode PCF.

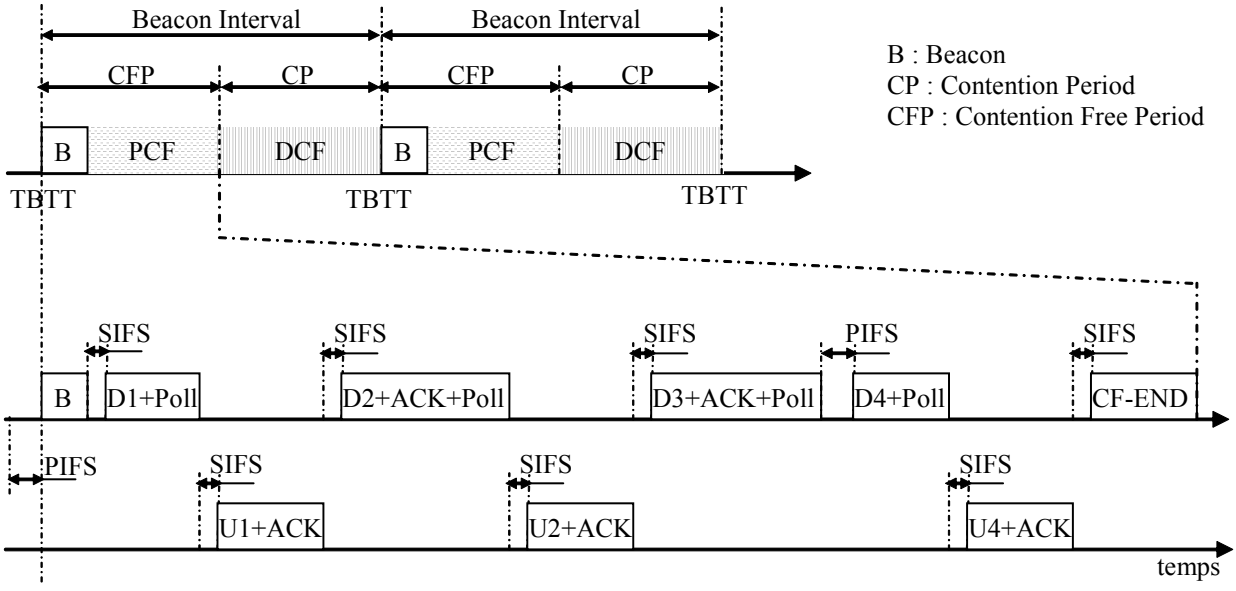

Fig. 1.4 Fonction de coordination centralisée

La trame Beacon est utilisée avec et sans le mode PCF. Quand le mode PCF n'est pas utilisé, cette trame permet de gérer le mode économie d'énergie des stations défini par le standard. Elle contient alors la liste des stations en veille ayant des trafics enregistrés au niveau des AP. Dans le mode PCF, après la transmission de la trame Beacon, l'AP commence par envoyer une trame Poll demandant à la première station de la liste de transmettre sa trame de données. Avec cette trame l'AP peut aussi renvoyer à la station les données possibles qui lui sont

destinées. La station répond alors en acquittant la réception de ces données et en transmettant son paquet. Pour la station suivante, en plus de la trame Poll et des données, l'AP renvoie aussi l'acquittement de la station précédente. Une station ne répondant pas à une demande d'envoi sera retirée de la liste. L'AP, après un temps PIFS passe alors à la station suivante. Le point d'accès peut mettre fin à la période CFP en diffusant une trame CF-End.

4. La qualité de service dans les réseaux IEEE 802.11

4.1. Problématique de la qualité de service dans les réseaux IEEE 802.11

Le développement du réseau Internet et le grand nombre d'utilisateurs connectés à ce réseau imposent le recours à des supports de qualité de service. Dans cette perspective, plusieurs groupes de travail ont vu le jour pour les réseaux filaires. Les nouveaux besoins en termes de mobilité des utilisateurs et la croissance des réseaux permettant le nomadisme des utilisateurs ont fait migrer le problème vers la boucle locale sans fils, entre autres les réseaux IEEE 802.11. Actuellement, le marché des télécommunications des réseaux Hotspot est relativement faible mais on s'attend à ce qu'il subisse une croissance accrue les prochaines années. Les fournisseurs d'accès à Internet commencent à mettre en place un large nombre de hotspots 802.11 ou Wi-Fi dans les divers lieux publics (Bruno, 2007). Des applications multimédia telles que la voix sur IP ou la vidéo sur demande en plus des applications classiques seront de plus en plus utilisées dans ce type de réseaux. Ces applications multimédia nécessitent un niveau minimal de qualité de service en termes de bande passante, de délai, de gigue ou de taux de perte. D'autres types d'applications avec des contraintes plus aiguës en termes de QoS commencent à émerger. Des applications du standard 802.11 en milieu industriel pour la commande et la supervision des systèmes ou en milieu médical pour la télémédecine (Soomro, 2007) imposent des exigences strictes en termes de QoS (délais + taux d'erreurs).

La réponse à ces besoins accrus en QoS dans les hotspots 802.11 est d'autant plus difficile à cause des caractéristiques spécifiques du médium sans fils. En effet, pour la couche physique DSSS permettant un débit au-delà de 11 Mbps, parmi 11 canaux possibles, seulement 3 ne se chevauchent pas. Ce médium présente alors un taux de perte assez élevé à cause des interférences. En plus, les caractéristiques du support physique ne sont pas constantes et varient dans le temps et dans l'espace (Ni, 2004). Quand les utilisateurs bougent, les chemins de bout en bout changent et les utilisateurs se réassocient chaque fois à des nouveaux APs.

Ces utilisateurs doivent avoir la même QoS indépendamment de leurs associations et du chemin de bout en bout du trafic.

Plusieurs travaux de recherche ont essayé d'évaluer les performances du standard IEEE802.11 quant à sa capacité de répondre aux besoins en termes de QoS des utilisateurs. Ces travaux ont investigué essentiellement les possibilités offertes par la sous couche MAC du standard pour garantir un niveau minimal de QoS pour les utilisateurs. Dans le même objectif, d'autres travaux ont adopté des modèles analytiques ou des approches par simulation. Plusieurs solutions ou approches pour l'amélioration du support de QoS par la couche MAC 802.11 ont été proposées.

4.2. Limites en termes de QoS du standard IEEE 802.11

Le contrôle d'accès au médium, le maintien de la QoS et la sécurité sont les fonctions les plus importantes de la sous couche MAC 802.11. Cependant plusieurs limitations se présentent quant au support de la qualité de service.

4.2.1. Limitations de la méthode d'accès de base DCF

Le protocole CSMA/CA utilisé avec cette méthode permet un accès Best Effort au canal. Les utilisateurs ne peuvent avoir aucune garantie de qualité de service minimale. Toutes les stations d'un même BSS concourent pour l'accès au canal et aux ressources du réseau avec les mêmes priorités. Aucun mécanisme de différenciation entre plusieurs types de flux n'est mis en place pour garantir la bande passante, le délai de bout en bout ou la gigue pour des trafics à hautes priorités tels que la voix sur IP ou la vidéo/visioconférence. Le taux des erreurs dues à la couche physique 802.11 est à peu près trois fois plus grand que celui observé dans les réseaux locaux filaires (Ni, 2005). Le nombre important de collisions et de retransmissions implique des délais de transmission imprévisibles et une dégradation de la qualité de transmission des flux temps réel tels que pour la voix ou la vidéo. Plusieurs simulations ont été effectuées pour la mesure des performances de la méthode DCF. (Ni et Al., 2004) ont utilisé ns-2 (ns-2, 2007) pour simuler une topologie de n stations (utilisant la couche physique 802.11a) fonctionnant en mode ad hoc. Ces stations qui sont fixes au cours des simulations génèrent trois types de trafics : audio, vidéo et un trafic de fond (Background traffic). La charge du réseau varie de 9,6% à 90 % en augmentant le nombre de stations de 2 à 18. La figure suivante présente les résultats de performance du mode DCF en termes de bande passante utilisée.

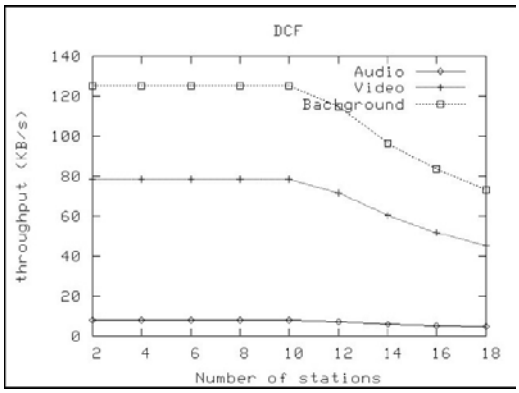

Fig. 1.5 Performances du mode DCF en termes de bande passante (Ni, 2004)

Quand le nombre de stations est supérieur à 10, la bande passante utilisée par les trois trafics décroît rapidement. La bande passante est aux alentours de 60% quand le réseau est chargé à 90%. Les performances du mode DCF en termes de délai moyen sont présentées par la figure 1.6.

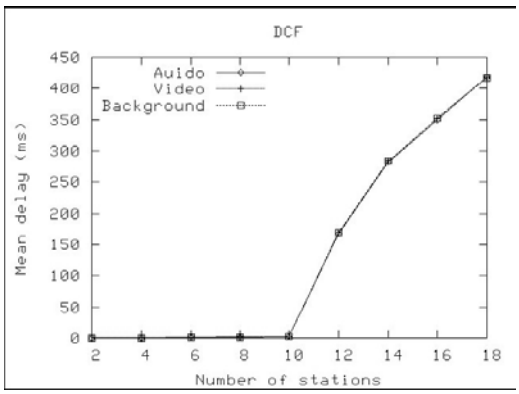

Fig. 1.6 Performances du mode DCF en termes de délais (Ni, 2004)

Cette figure montre que le délai atteint la valeur 420 ms et ce d'une façon égale pour l'ensemble des trafics. Ces simulations démontrent clairement qu'aucune classification ni en termes de bande passante ni en termes de délai n'est assurée pour les utilisateurs du réseau. Ils présentent approximativement les mêmes délais du moment qu'ils partagent tous la même file d'attente pour l'accès au médium.

Pour améliorer les performances de la méthode DCF, un nombre de paramètres d'accès pour la couche physique et la sous couche MAC 802.11 sont paramétrables (Gast, 2002). Parmi ces paramètres, on peut citer :

- L'intervalle balise (Beacon Interval) : détermine la période d'envoi des trames balises. L'augmentation de ce paramètre permet d'améliorer la bande passante et l'autonomie des stations sans fils. Sa diminution permet aux stations de bouger rapidement tout en gardant la connectivité au réseau.

- le seuil RTS (RTS threshold) : en l'absence de nœuds cachés et d'interférences, son augmentation permet d'augmenter le maximum de bande passante disponible. En présence de nœuds cachés, on améliore la bande passante en le décrémentant.
- Le seuil de fragmentation (Fragmentation threshold) : la bande passante varie proportionnellement à ce paramètre uniquement quand il n'y pas d'erreurs de transmission sur le canal.
- Limite courtes et longues retransmissions (short/long retry limit) : C'est le nombre maximal de retransmissions permises pour les trames plus courtes/longues que le seuil RTS. L'incrémentation de ce paramètre permet de diminuer le taux de perte des trames. En revanche il y aura une itération de temps de backoff plus longue et donc moins de bande passante disponible. En diminuant ces paramètres, on minimise la taille des buffers tout en augmentant le taux de perte des trames.

(Zhu et Al, 2004) ont montré que la variation de l'ensemble de ces paramètres ne permet pas de différencier plusieurs types de flux. Il est donc nécessaire de recourir à des solutions additionnelles pour garantir la QoS nécessaire aux utilisateurs.

Les travaux effectués par (Heusse et Al, 2003) ont permis de détecter un ensemble d'anomalies dans le fonctionnement de la méthode DCF. Des simulations effectuées sur un modèle analytique établi par les auteurs, consolidées par des mesures sur une plateforme réelle ont montré que la bande passante réellement disponible pour les utilisateurs sans fils est inférieure au débit nominal de 11 Mbps (pour le 802.11b). Cette bande passante cumulée pour l'ensemble des stations est aux alentours de 6,5 Mpbs (Heusse, 2003) comme montré dans la figure 1.7. Ces valeurs sont aussi confirmées par les tests montrés dans (Labiod, 2004) sur des flux TCP et UDP avec un nombre de stations variable (la distance séparant deux stations est aussi variable).

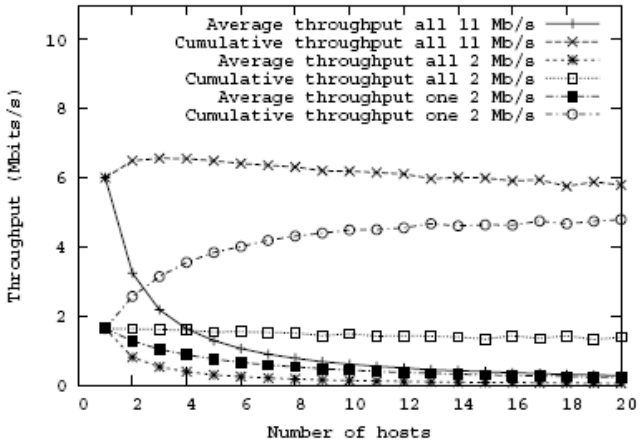

Fig. 1.7 Bande passante cumulée dans une cellule (Heusse, 2003)

Ces simulations montrent aussi, que lorsqu'une station de la cellule fonctionne avec un faible débit théorique (2 Mbps), ceci affecte le débit de transmissions des autres stations fonctionnant à un débit théorique plus élevé.

La mobilité intra et intercellulaire peut également conduire à une dégradation de la performance globale du réseau. Quand les stations bougent à l'intérieur d'un même BSS ceci peut affecter le taux d'erreurs binaires et réduire ainsi les débits de transmission. En ce qui concerne la mobilité entre des BSS différents, ceci peut affecter l'acheminement des flux multimédia puisque le mode DCF n'offre aucun mécanisme pour l'accélération ou la prise en compte des handovers.

La présence de plusieurs points d'accès avec des zones de couverture communes conduit à une dégradation plus grave des performances du mode d'accès DCF (Pries, 2006). Les résultats de simulation obtenus par les auteurs montrent clairement que la méthode d'accès DCF est loin d'être satisfaisante par exemple pour l'acheminement de la voix. Le taux de perte observé pour ce type de flux atteint 59,97%. DCF ne peut fournir aucun support de qualité de service.

4.2.2. Limitations de la méthode d'accès PCF

Spécialement conçue pour apporter un support de qualité de service en priorisant les applications temps réel par rapport aux autres, cette procédure d'accès avec scrutation souffre de plusieurs défaillances. Tout d'abord ce mode ne peut être utilisé qu'en alternance avec le mode d'accès DCF et ne peut jamais fonctionner à part entière. PCF présente tous les inconvénients d'une approche centralisée tel que l'effet d'une défaillance du point central. En plus, à faible charge, les stations voulant émettre en mode PCF subiront des délais très élevés. Elles seront obligées d'attendre d'être scrutées avant d'émettre (Lindgren, 2001). De plus, le

coordinateur (généralement confondu avec le point d'accès) doit systématiquement accéder au canal sans fil lors de la période DCF afin de débuter la période PCF suivante. Dans certains cas, il peut être difficile de garantir l'établissement de ce mode d'une façon périodique. En effet, le point de coordination génère des trames balises à des intervalles réguliers. Ces trames indiquent le temps TBTT correspondant à l'instant d'émission de la prochaine trame balise. A l'instant TBTT, le point d'accès se prépare à émettre la trame balise mais doit attendre que le médium soit libre pendant une durée PIFS. Cette trame pourra effectivement être retardée à cause d'une activité sur le médium qui entraînera un retard dans la transmission des trames devant s'effectuer dans la période sans contention. Selon les textes du standard 802.11, les stations commencent à émettre leurs trames même si leur émission continuera après l'écoulement du TBTT. Un retard imprévisible peut donc être introduit dans chaque période sans contention CFP (Labiod, 2004), c'est le problème d'écourtement.

Dans le mode PCF, il sera très difficile de répondre aux besoins d'un nombre important de trafics temps réel sans pénaliser les applications qui se dérouleront par la suite dans la période avec contention (Zhu, 2004). Un autre problème de ce mode est l'impossibilité de prévoir la durée de transmission des stations sollicitées. Une station sollicitée par le point coordinateur peut transmettre un MSDU de taille maximale 2304 octets. Cependant, le standard n'empêche pas sa fragmentation en plusieurs MPDU. Ceci, en plus des débits de transmission dépendant de l'état du canal physique, conduit à une durée de transmission d'un MSDU non contrôlée par le point coordinateur ce qui induira des délais supplémentaires pour le reste des stations en mode PCF (Mangold, 2003). Enfin le mode PCF est géré par un algorithme de scrutation Round-Robin à une seule classe. Il ne lui est donc pas possible de répondre aux besoins de QoS de plusieurs types de flux (voix, vidéo,…).

4.3. Les différentes solutions de qualité de service dans les réseaux IEEE 802.11

4.3.1 Introduction

Depuis l'écriture du standard IEEE 802.11 à la fin des années 90, plusieurs propositions, issues de travaux de recherches et/ou d'initiatives de la part de constructeurs, ont vu le jour pour l'amélioration du support de qualité de service dans ces réseaux. Un groupe de travail spécifique a été formé au sein de l'IEEE dans l'objectif de normaliser des amendements de la qualité de service pour le protocole 802.11. La norme 802.11e a ainsi été élaborée. Elle reprend entre autres des techniques introduites dans divers travaux de recherche. Dans la suite

de ce paragraphe nous présentons tout d'abord la norme IEEE 802.11e puis nous présenterons plusieurs approches (non normalisées) visant à améliorer la QoS dans les réseaux 802.11.

4.3.2 Le nouveau standard IEEE 802.11e

4.3.2.1 Introduction

Pour supporter la qualité de service, le groupe de travail "e" du standard 802.11 définit des améliorations de la couche MAC de 802.11 (Mangold, 2003) en introduisant une fonction de coordination hybride (HCF : Hybrid Coordination Function). HCF définit deux mécanismes d'accès au canal (synonyme d'accès au médium dans 802.11e) : accès avec contention et accès contrôlé. La méthode d'accès avec contention est nommée EDCA (Enhanced Distributed Channel Access). La deuxième méthode, offrant un accès contrôlé, est nommée HCCA (HCF Controled Channel Access). Les stations sans fils opérant sous 802.11e (IEEE, 2004b) sont appelées stations améliorées (enhanced stations). La station améliorée qui joue le rôle de contrôleur central au sein de la même cellule QBSS (QoS BSS) est appelée le point de coordination hybride (HC : Hybrid Coordinator). Le point de coordination hybride est typiquement combiné au point d'accès. Un QBSS est un BSS qui inclut un HC et des stations améliorées. Les paramètres QoS sont ajustés au cours du temps par le coordinateur hybride et sont annoncés périodiquement à travers les trames balises. Plusieurs entités de Backoff (Backoff Entity) fonctionnent en parallèle dans une station améliorée. Une entité de backoff est une file de transmission pour une classe de trafic bien déterminée avec des paramètres d'accès au canal spécifiques. Une station 802.11e ou plus précisément une entité de backoff ne peut utiliser le canal que pour une durée limitée. L'intervalle de temps durant lequel la station a le droit d'émettre est appelé l'opportunité de transmission TXOP (Transmission Opportunity). TXOP est défini par un instant de début et une durée. Un intervalle TXOP obtenu suite à une contention au canal est appelé EDCA-TXOP. Quand cet intervalle est obtenu dans la période contrôlée par le HC, il est appelé HCCA-TXOP. La durée d'une EDCA-TXOP est limitée par la valeur du paramètre QBSS-limit-TXOP régulièrement distribuée par le point d'accès à travers les trames balises (beacon). Ce paramètre permet donc de contrôler la durée maximale d'une transmission en cours ce qui est important pour les délais d'accès et de transmission de l'ensemble des stations. L'utilisation de ce paramètre permet aussi d'assurer à un instant précis et sans retard, le démarrage de chaque période d'accès contrôlée par le HC. Une entité ne sera autorisée à transmettre sur le support que si sa

transmission arrive à terme avant le prochain TBTT. Le problème d'écourtement ne peut plus se produire avec 802.11e.

Une autre amélioration est apportée par le nouveau standard : les stations améliorées sont maintenant autorisées à transmettre directement des trames à une autre entité du QBSS sans être obligées de passer par le point d'accès. Ce fait permet d'optimiser l'utilisation de la bande passante partagée entre les utilisateurs. Dans le standard 802.11, toutes les communications passaient obligatoirement par le point d'accès.

4.3.2.2 La méthode d'accès EDCA

Dans le mode d'accès EDCA, le support de la qualité de service est assuré par l'introduction de plusieurs catégories d'accès (AC : Access Categories). On peut avoir au total huit classes de trafics différentes pour huit priorités utilisateurs définies dans IEEE 802.1D (IEEE, 1998). A chaque catégorie d'accès est associée une entité de backoff ou file d'attente indépendante. En utilisant des paramètres de contention spécifiques, des priorités différentes sont attribuées à l'ensemble des AC. Dans le modèle simplifié du 802.11e, 4 catégories sont implémentées (Figure 1.8). Ce modèle a été adopté en observant que les huit classes d'application utilisateurs définies précédemment ne se déroulent jamais simultanément (Ni, 2004). L'utilisation d'un nombre réduit de files d'attentes par rapport au nombre de priorités utilisateurs permet de limiter les risques de saturation de la sous couche MAC. Les huit priorités utilisateurs sont alors mappées dans 4 files d'attentes. Des applications spécifiques (Mangold, 2003) sont généralement associées à chacune des files (Vidéo, Voix, Best Effort, Background).

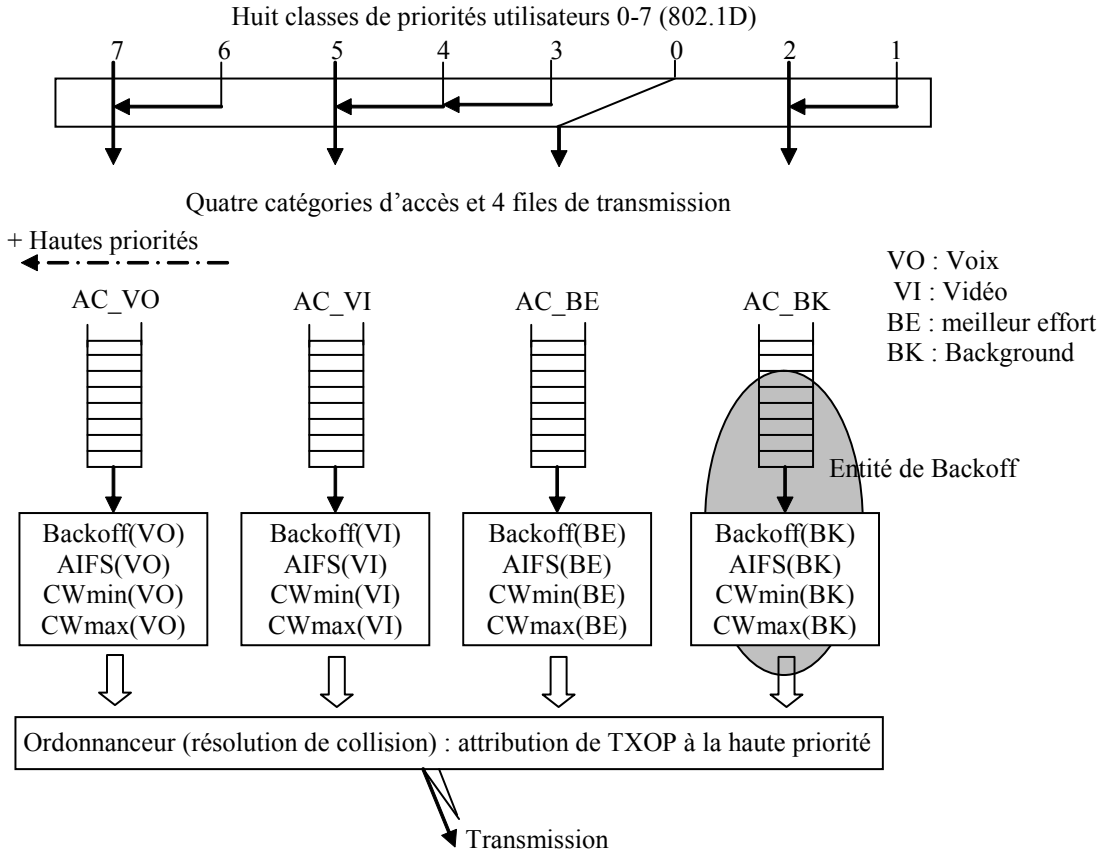

Fig.1.8 Quatre files d'accès d'une station améliorée 802.11e

La contention au canal est effectuée par chacune des entités de backoff d'une façon indépendante des autres. Les paramètres utilisés pour l'accès au canal permettent d'affecter des priorités différentes pour chaque catégorie d'accès. Ces paramètres qui seront identiques pour la même catégorie d'accès dans toutes les stations du QBSS, peuvent être modifiés par le HC au cours du temps. Ces paramètres sont :

- le temps inter trames AIFS[AC] : au lieu du temps DIFS d'une station 802.11, avant d'accéder au canal une entité de backoff doit attendre un temps AIFS[AC] (Arbitration IFS). Les valeurs les plus faibles sont affectées aux priorités les plus hautes. Ce temps est calculé par :

  AIFS[AC] = SIFS + AIFSN[AC]*SlotTime, AIFSN[AC] ≥ 2 (IEEE, 2004b)

  AIFSN (Arbitration IFS Number) est le nombre arbitraire de temps inter trames. Un nombre arbitraire sera alors affecté à chaque catégorie d'accès (contrairement à la norme de base, où une seule valeur est affectée à toutes les stations mobiles). La valeur la plus faible de AIFSN sera égale à 2 ce qui donne une valeur de AIFS minimale égale à DIFS (si AIFSN = 1, le temps inter trames serait égal à PIFS, valeur toujours affectée à un AP).

- la valeur minimale de la fenêtre de contention CWmin[AC] : quand une collision se produit, les entités de backoff entrant en collision doivent choisir aléatoirement un temps d'attente de backoff. Ce temps est choisi dans l'intervalle [CWmin[AC], CWmax[AC]]. Pour chaque entité de backoff, si elle voit que le canal est libre pendant une durée égale à AIFS[AC], elle commence le décompte du temps de backoff qu'elle a choisi. L'entité commence à transmettre un slot time après le décompte total du temporisateur de backoff. Pour les catégories d'accès à hautes priorités des valeurs plus faibles du seuil minimal de la fenêtre de contention CWmin[AC] sont utilisées. Les entités de backoff correspondantes ont alors plus de chances d'accéder au canal. Cependant, le choix de valeurs faibles augmente la probabilité de collision si plusieurs entités de backoff de la même catégorie se trouvent dans le même QBSS.
- La valeur maximale de la fenêtre de contention CWmax[AC] : quand une collision se produit, une deuxième valeur du compteur de backoff, supérieure à la première doit être choisie. Cette valeur reste toujours inférieure à une valeur maximale CWmax[AC] correspondant à chaque catégorie d'accès. Les valeurs les plus faibles de CWmax[AC] permettent une probabilité d'accès plus rapide et sont donc attribuées aux priorités hautes.
- Un facteur de persistance PF[AC] : ce paramètre est utilisé pour réduire la probabilité de collision entre plusieurs catégories d'accès. Dans le standard 802.11, la taille de la fenêtre de contention est doublée après un échec d'accès au canal (facteur de persistance égal à 2). EDCA utilise le paramètre PF pour incrémenter la taille de la fenêtre CW différemment pour chaque classe de trafic ou catégorie d'accès.
- TXOPlimit[AC] : en plus des paramètres de backoff, l'opportunité de transmission peut être affectée différemment pour les catégories d'accès. La définition d'une durée de transmission maximale plus large pour une catégorie d'accès permet à l'application correspondante de bénéficier d'une bande passante plus importante, le standard 802.11e autorise la transmission de plusieurs MSDU au sein d'une seule TXOP.

Le tableau suivant présente les valeurs des paramètres de la méthode d'accès EDCA utilisés dans le standard (IEEE, 2004b).

Tab.1.3 Exemple de valeurs des paramètres d'accès

	AC_VO	**AC_VI**	**AC_BE**	**AC_BK**
AIFSN	2	2	3	7
CWmin	3	7	15	15
CWmax	7	15	1023	1023

D'une façon similaire au standard 802.11, des compteurs de retransmission sont aussi définis pour 802.11e. Le 802.11e introduit en plus une durée de vie maximale des MSDU dans chaque file d'attente. Dépassant cette durée dans la sous couche MAC la trame est éliminée. Cette approche est efficace pour des applications temps réel pour lesquelles des trames transmises en retard n'ont plus d'intérêt.

La figure suivante représente la contention des quatre classes de trafic pour l'accès au canal en utilisant l'ensemble des paramètres.

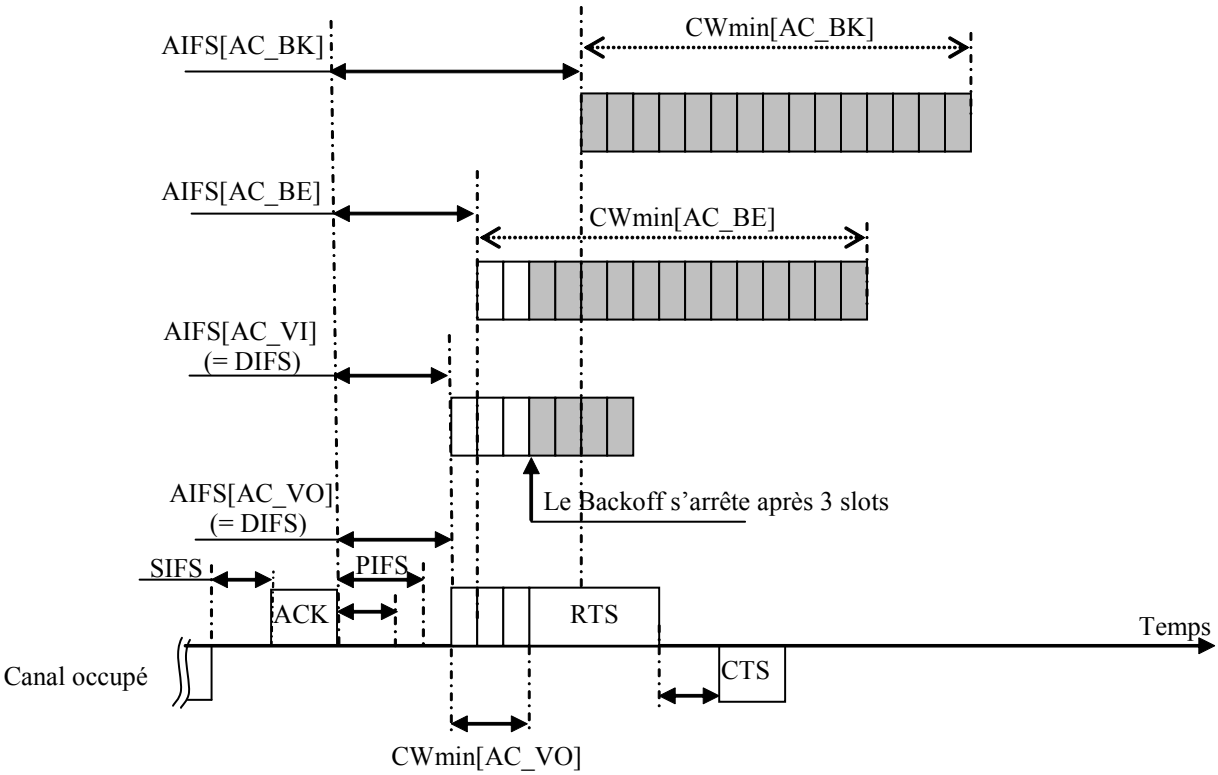

Fig. 1.9 La contention au canal pendant une période EDCA

Durant la contention au canal, quand les compteurs de backoff de deux ou plusieurs entités de backoff d'une station donnée atteignent la valeur zéro au même instant, une collision virtuelle a lieu. Mises à part les autres stations essayant d'accéder au canal, pour cette station, l'entité de backoff avec la plus haute priorité va transmettre sur le canal. Les autres entités réagissent comme si une vraie collision avait lieu sur le canal.

4.3.2.3 La méthode d'accès HCCA

Le mode d'accès contrôlé de la méthode HCF, nommé HCCA, est un mode d'accès sans contention au canal. Les entités de backoff d'une station donnée seront explicitement sollicitées par le HC pour une possibilité de transmission sur le canal. Pour lancer ce mode, le HC doit tout d'abord accéder au canal au cours du mode EDCA : le HC possède la plus haute

priorité par rapport à l'ensemble des catégories d'accès. En effet, le HC est autorisé à transmettre si le canal est libre pendant une durée PIFS (sans backoff). Le point coordinateur ou HC commence par transmettre une trame de contrôle QoS CF-Poll. Cette trame est utilisée pour scruter les stations voulant émettre par la suite en mode sans contention. Elle définit aussi les débuts et les durées maximales des transmissions HCCA-TXOP. Durant une période HCCA-TXOP, une station peut transmettre plusieurs trames selon un algorithme d'ordonnancement dans la limite du temps maximal alloué (TXOPlimit). Un temps SIFS sépare deux trames consécutives d'un même émetteur. Le mode HCCA est beaucoup plus flexible que le mode PCF du standard 802.11. En effet, en plus de la période sans contention, un QAP peut initier une période HCCA-TXOP à tout moment pendant la période avec contention. Cependant, pour garantir des périodes de temps suffisantes pour le mode EDCA, une durée maximale du mode HCCA est définie par la variable TCAPLimit (Ni, 2005). La figure suivante illustre un exemple de supertrame 802.11e.

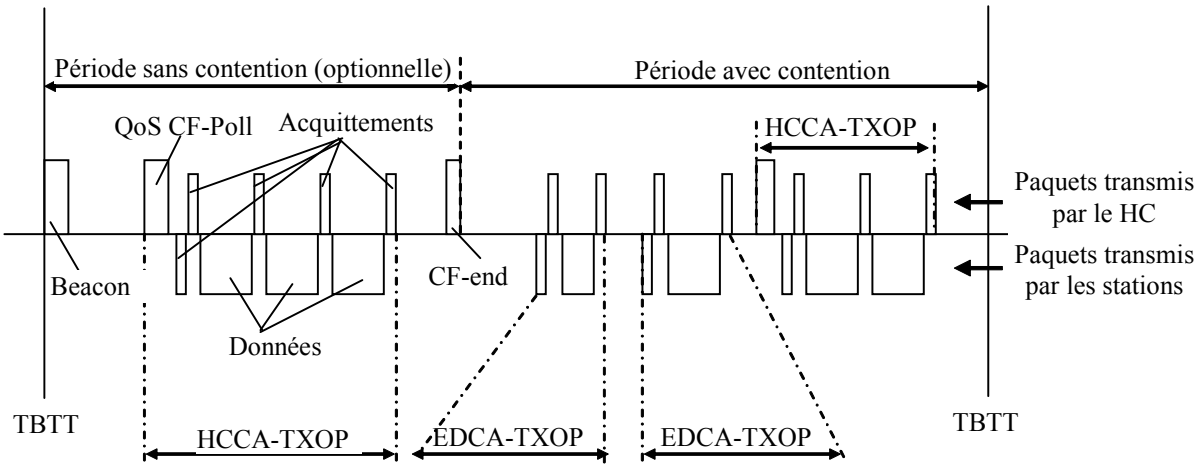

Fig. 1.10 Procédure HCF

4.3.2.4 Améliorations sur la norme IEEE 802.11e

Le fonctionnement de la nouvelle méthode d'accès IEEE 802.11e a été amélioré par l'ajout de nouvelles techniques :

- acquittement groupé (Block Acknowledgement) : pour améliorer les performances au niveau MAC en augmentant la bande passante disponible, le mécanisme d'acquittement groupé peut être utilisé. Ce mécanisme consiste à envoyer une seule trame d'acquittement pour un groupe de trames de données. Le nombre de trames dans chaque groupe est limité (Labiod, 2004). Les trames de chaque groupe sont envoyées successivement séparées par un SIFS. A la fin de la transmission de ce groupe, une seule trame d'acquittement BlockAck est renvoyée par le récepteur pour indiquer à

l'émetteur les trames reçues correctement. Deux types d'acquittement groupé peuvent être utilisés dans 802.11e, *immédiat* et *retardé* (Ni, 2004). Dans le premier cas, après la transmission d'un groupe de trames de données, l'émetteur envoie une trame BlockAck-Request. Après un SIFS, le récepteur doit acquitter les trames correctement reçues par un BlockAck. A la réception de cette trame, l'émetteur retransmet les trames non acquittées groupées ou individuellement. L'acquittement groupé immédiat est efficace pour des applications nécessitant une large bande passante et des délais de transmission limités. La génération d'un BlockAck dans un délai SIFS reste difficile à implémenter. L'acquittement groupé retardé ne nécessite pas des délais de réponse stricts. Le récepteur doit tout d'abord acquitter la réception de BlockAck-Request par une trame ACK. Le récepteur peut ensuite répondre par une trame BlockAck dans un délai BlockAckTimeout. En l'absence de ces deux dernières trames, l'émetteur retransmet la trame BlockAck-Request. Dans la limite d'un nombre de retransmissions donné, l'émetteur supprime toutes les trames du groupe (Ni, 2004). Ce type d'acquittement groupé peut être utilisé pour des applications tolérant des délais modérés.

- Lien direct : le standard IEEE 802.11 ne permet pas à deux stations dans une configuration avec infrastructure de communiquer ensemble. Toutes les communications doivent impérativement passer par le point d'accès. Ceci implique une double consommation en termes de bande passante. Pour cette raison le standard 802.11e propose un protocole de lien direct DLP (Direct Link Protocol) permettant aux stations QSTA se trouvant dans le même BSS, de communiquer directement entre elles. A la réponse du récepteur à la requête de l'émetteur, la communication est établie. Si les deux stations n'échangent pas de trames au bout d'un temps DLPIdleTimeout, le lien direct est désactivé (IEEE, 2004b). La fonctionnalité de lien direct est optionnelle. L'utilisation de cette technique réduit l'efficacité du mode d'économie d'énergie du standard. En effet quand elle est utilisée les stations ne peuvent plus se mettre en veille : les paquets qui leurs sont destinés ne peuvent plus être stockés au niveau du point d'accès qui n'intervient plus dans la communication.

4.3.3 Améliorations basées sur la différentiation de services

L'amélioration de la qualité de service est assurée en intégrant une différentiation de services (bande passante, délai, gigue) au niveau de la couche MAC. Pour chaque station ou flux, on modifie les différents paramètres d'accès au support sans fil. Dans la littérature, il existe

plusieurs classifications des approches basées sur la différentiation de services : approches distribuées (améliorant la méthode DCF) ou centralisées (améliorant la méthode PCF), approches par station ou par flux. Ni et al (Ni, 2004) proposent une classification à deux niveaux. Cette classification est présentée dans la figure suivante.

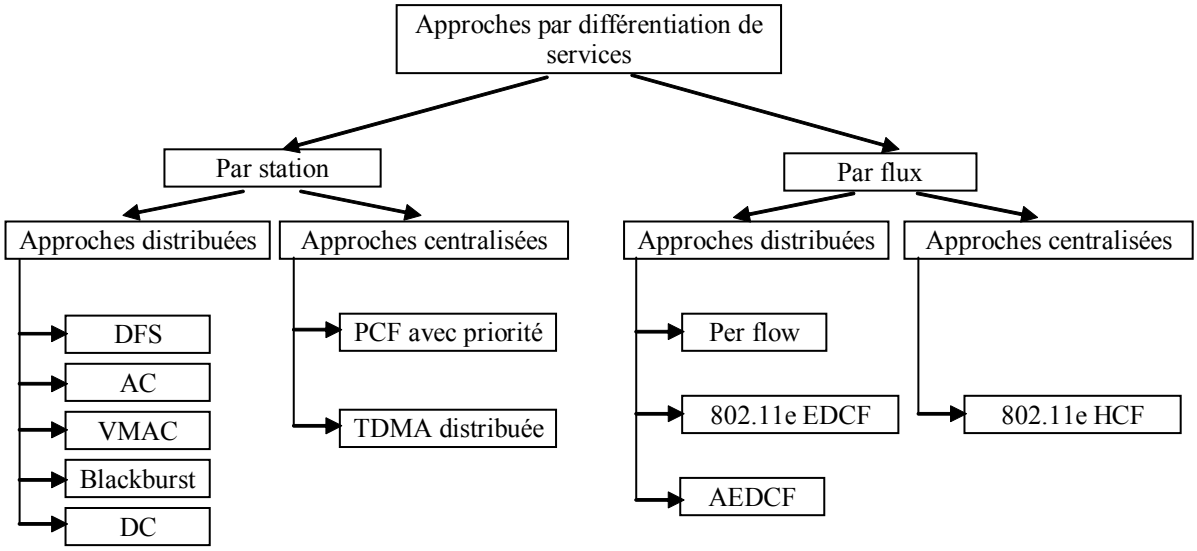

Fig. 1.11 Classification des approches de différentiation de services

802.11e est la principale approche "par flux", elle a été présentée précédemment, nous présentons par la suite quelques approches "par station".

DFS (Distributed Fair Scheduling) :

La méthode DFS effectue une différentiation basée sur l'intervalle de backoff. Avant chaque transmission, chaque station doit choisir aléatoirement un intervalle de backoff. Pour chaque classe de trafic est attribué un certain poids proportionnel à la bande passante nécessaire. L'intervalle de backoff, affecté à chaque flux, est fonction de son poids et de la taille du paquet à envoyer. Ceci permet de partager équitablement la bande passante disponible. (Vaidya, 2000). Les stations qui transmettent en premier sont celles qui possèdent le plus petit intervalle de backoff. L'approche DFS est obtenue en modifiant la fonction de coordination distribuée du standard. Elle est basée sur la technique d'"attente partagée" connue sous le nom de SCFQ (Self-Clocked Fair queuing) (Golestani, 1994). L'intervalle de backoff est calculé par la formule :

$$B = \left\lfloor \rho \times \left\lfloor Facteur_Echelle \times \frac{taille_{paquet}}{\phi} \right\rfloor \right\rfloor .$$

Avec ϕ le poids de la station

et ρ une variable aléatoire uniformément distribuée dans l'intervalle [0.99, 1.1]

Le paramètre Facteur_Echelle est utilisé pour mettre à l'échelle les valeurs des intervalles de backoff. En cas de collision une nouvelle fenêtre de backoff est calculée en utilisant l'algorithme de backoff défini par le standard.

Blackburst (Sobrinho, 1996)(Sobrinho, 1999):

Pour optimiser le déroulement des applications temps réel, une méthode nommée blackburst a été proposée dans (Sobrinho, 1996) et améliorée dans (Sobrinho, 1999). L'objectif de cette méthode est de minimiser les délais d'accès pour les trafics temps réel. Elle permet de bloquer le canal radio pendant une période de temps et impose aux stations des intervalles précis pour les tentatives d'accès. Une station à haute priorité doit vérifier tout d'abord que le canal est libre pendant une durée PIFS et transmet sa trame. Si le canal est occupé, la station doit attendre que le canal soit libre pendant PIFS puis commence une période de contention « black burst ». La station bloque le canal pendant une certaine période de temps en envoyant une trame (dite alors *black burst*). La longueur de cette trame, en nombre de *black slot*, dépend de la durée d'attente au cours de laquelle le canal était occupé. Après l'envoi du *black burst*, la station écoute le canal pendant une faible période de temps (inférieure à la durée d'un *black slot*). La station pourra ainsi savoir si d'autres stations (ayant attendu le canal pour des durées plus longues) sont en train d'envoyer des *black burst* plus longs. Si le canal est libre, la station transmet sa trame. Sinon, elle doit attendre que le canal soit de nouveau libre pour commencer une nouvelle période de contention. L'utilisation des *black slot* et des trames de tailles minimales pour les trafics temps réel garantit un vainqueur unique pour chaque période de contention black burst (Sobrinho, 1996). Avec la méthode d'accès blackburst, les stations à faible priorité utilisent la méthode d'accès ordinaire DCF du standard.

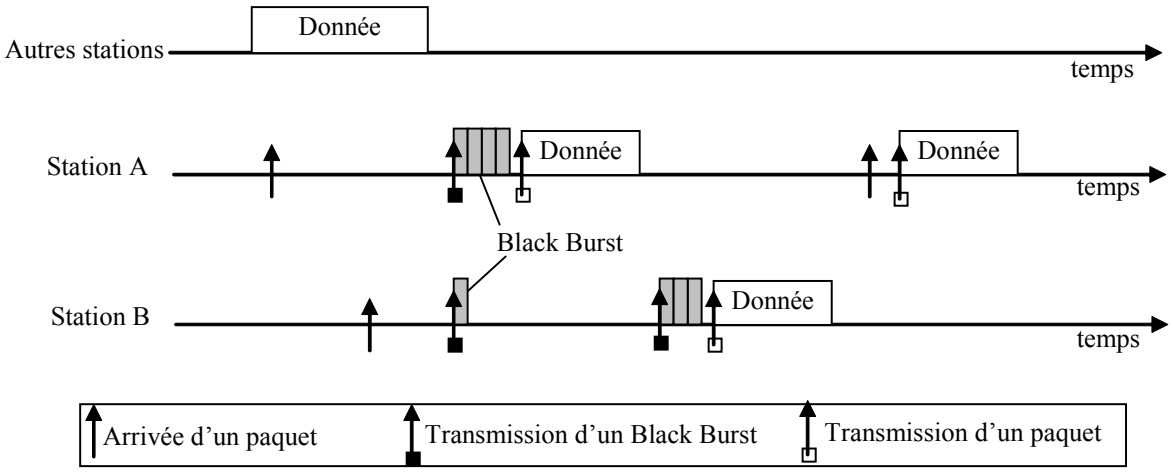

Fig. 1.12 Méthode d'accès Black Burst

La figure 1.12 présente la méthode d'accès Blackburst. Les simulations réalisées dans (Ni, 2004) montrent que backburst peut supporter un nombre plus important d'applications temps réel qu'avec la méthode d'accès CSMA/CA du standard. Ceci est dû notamment à l'absence de collisions. Cette méthode permet en outre des valeurs très faibles de délais et de gigue même si le réseau est chargé. L'inconvénient majeur de cette méthode est qu'elle nécessite des accès à des intervalles de temps réguliers car sinon une dégradation des performances est observée.

VMAC (Virtual MAC) :

En se basant sur la méthode DCF, Campbell et Al. (Veres, 2001) proposent deux nouveaux algorithmes MAC virtuel (VMAC) et source virtuelle (VS). VMAC observe passivement le canal radio et établit des estimations locales des délais, des gigues, des collisions et des pertes de paquets en prenant en compte les conditions locales et les interférences des cellules voisines. En utilisant les estimations de VMAC, VS ajuste les paramètres de l'application et détermine si une nouvelle session demandant un certain niveau de service peut être admise. Pour estimer la capacité libre du canal, on mesure le temps de libre après DIFS. VMAC et VS fonctionnent en parallèle avec l'application réelle et le protocole MAC du nœud concerné pour estimer le niveau de service. Ils émulent le comportement d'un trafic réel et son MAC en générant des paquets virtuels. Cependant, on ne transmet pas de données réellement. Les paquets sont estampillés et mis dans une mémoire tampon virtuelle. Ensuite les paquets sont mis en ordre pour être transmis sur le canal, après un certain backoff, comme si on utilisait un MAC réel. Cependant, au lieu de transmettre le paquet virtuel, le VMAC estime la probabilité de collision si ces paquets étaient envoyés. En cas de collision, VMAC double le backoff comme un MAC réel aurait fait. S'il n'y a pas de collision, VMAC estime le délai total et le surcoût. Tous les autres aspects MAC (les retransmissions, l'incrémentation et la décrémentation des fenêtres de backoff, etc.) sont émulés. Les résultats de simulations effectués avec ces algorithmes distribués montrent que leur utilisation pour le contrôle d'accès au canal radio permet le maintien d'un état globalement stable sans avoir à utiliser des méthodes centralisés pour la gestion des ressources radio. La différentiation des délais peut être assurée en augmentant l'écart entre les valeurs de CW_{min} affectées pour les hautes et faibles priorités. L'un des inconvénients de cette méthode est la complexité introduite par les interactions entre les couches MAC et la couche application.

Approche AC (Aad et Castelluccia) :

Pour assurer une certaine différentiation de service offert à différents nœuds, Aad et Castelluccia (Aad, 2001) ont introduit une différentiation dans divers paramètres de la fonction de coordination distribuée du standard. Tout d'abord, des facteurs d'incrémentation du backoff différents sont utilisés pour chaque priorité. Après une éventuelle collision, une station sans fil *i* multiplie la taille de sa fenêtre de contention par un facteur d'incrémentation *Pi* au lieu de 2 (du standard). Quand *Pi* est grand, la fenêtre de contention de la station *i* est grande en moyenne. Par la suite elle a moins de chance d'accéder au canal. Les expérimentations montrent que cette différentiation fonctionne bien pour un flux UDP. Avec un flux TCP les performances de cette méthode sont faibles à cause des acquittements TCP qui possèdent la même priorité. Suite aux limitations de cette différentiation, les auteurs ont proposé une seconde méthode (Aad, 2003). En effet, lorsque le nombre de terminaux en contention est faible et dans la mesure où la valeur CW est dans la plupart du temps égale à CWmin, l'idée est alors de faire un choix adéquat de cette valeur initiale (CWmin) pour chaque classe de service afin d'apporter une différentiation de services entre ces classes. Cette proposition résout partiellement les problèmes de la méthode précédente. Une différentiation de services plus claire est obtenue pour les flux UDP lorsque le nombre de terminaux est petit. Cependant, ce mécanisme ne permet toujours pas d'obtenir une différentiation de services stricte pour les flux TCP (Aad, 2003).

Des temps inter trame DIFS différents sont aussi utilisés en fonction de chaque priorité. Des temps d'attente plus faibles sont attribués aux hautes priorités. L'inconvénient de cette différentiation est que les basses priorités vont souffrir tant que les hautes priorités ont des paquets à transmettre. Un autre type de différentiation est aussi utilisé par cette méthode : une différentiation par limitation des tailles des paquets : on impose aux différentes priorités de transmettre des paquets de tailles différentes. Le débit utile obtenu par une priorité sera proportionnel à la taille de ses paquets. Deux types d'implémentation de cette différentiation sont possibles : rejeter les paquets dépassant la taille maximale allouée à une station ou bien fragmenter les paquets dépassant ce seuil maximal. Cela permet d'assurer à la fois la différentiation et la fiabilité des transmissions pour les différents types de flux. L'inconvénient de cette différentiation est qu'elle perd son efficacité dans les environnements bruités. Les paquets les plus longs, correspondant aux plus hautes priorités ont plus de chance d'être corrompus.

Approche DC (Deng et Chang) :

Deng et Chang (Deng, 1999) proposent une approche de différentiation de services avec des modifications minimales de la méthode DCF du standard. La différentiation est assurée par deux paramètres de la couche MAC 802.11 : l'intervalle de Backoff et le temps inter trame. Deux temps de backoff sont proposés. Chacun est combiné avec deux temps inter trame différents PIFS et DIFS. Quatre classes de priorités sont alors obtenues. Avec cette méthode, les stations à hautes priorités doivent attendre un temps plus court pour accéder au canal (PIFS). Quand une collision a lieu, les stations à hautes priorités ont plus chance d'accéder au canal en possédant des intervalles de backoff plus court. Cependant, quand il n'y a que des stations à faibles priorités voulant transmettre sur le canal, elles continuent quand même à utiliser de longs intervalles de backoff. Des délais plus longs sont alors observés lors de l'accès au canal.

PCF avec priorité :

Les travaux de recherches travaillant sur la différentiation de services sur la méthode d'accès PCF sont peu nombreux vu que cette méthode est déjà facultative dans le standard. Cependant, cette méthode peut offrir une différentiation de service en interrogeant les stations en se basant sur la priorité, au lieu d'utiliser une méthode de scrutation basé sur l'algorithme Round Robin (Ganz, 2001).

TDMA distribuée :

Cette méthode ne modifie pas le mécanisme d'interrogation de la méthode PCF. Elle intervient au niveau des périodes de temps ou time slots de TDMA et spécifie pour chaque station le slot time au cours duquel elle peut transmettre. La transmission des paquets peut alors avoir lieu avec une faible intervention du point d'accès.

4.3.4 Améliorations basées sur le contrôle d'erreurs

L'amélioration de la qualité de service peut aussi être assurée en améliorant les techniques de contrôle des erreurs. Les réseaux sans fil nécessitent une détection et correction des erreurs au niveau LLC et au niveau MAC (Ni, 2004). Deux techniques de correction des erreurs sont principalement utilisées : ARQ (Automatic Repeat reQuest) et FEC (Forward Error Correction). ARQ est un protocole de contrôle d'erreurs largement implémenté aux niveaux liaison et transport. Il est efficace dans les réseaux sans fil à hauts débits où les délais d'aller retour sont faibles. Cependant il peut causer de larges délais quand il s'agit d'un nombre important de retransmission sur des liens à faibles débits. Plusieurs dérivés de ce protocole

sont utilisés. La technique FEC utilise des bits supplémentaires pour faciliter la correction des erreurs. Il est plutôt utilisé pour les trafics temps réel qui nécessitent des garanties de délais. Cependant, ce protocole génère un trafic supplémentaire même s'il n'y a pas des erreurs sur le canal. Avec ARQ, un récepteur ne demande une retransmission que si une erreur est détectée. Ceci peut engendrer une variation de délais inacceptable pour les trafics temps réel. Des techniques hybrides intégrant à la fois le protocole ARQ et FEC sont utilisées.

4.3.5 Autres approches d'amélioration de la QoS

D'autres approches pour l'amélioration de la qualité de service dans les réseaux IEEE 802.11 ont été proposées dans plusieurs travaux de recherches. Voyant que les améliorations apportées par le standard IEEE 802.11e ne permettent pas d'éviter la saturation du canal ou de définir une méthode de partage de la bande passante, Gallardo et Al. (Gallardo, 2007) proposent un nouvel algorithme pour le contrôle d'accès au médium sans fil. L'objectif de cet algorithme est d'offrir des garanties réelles de qualité de service pour les utilisateurs du réseau 802.11. L'exécution de cet algorithme permet de fournir une décision sur la possibilité ou non d'accepter un nouveau trafic de paquets sans violer les garanties de qualité de service nécessaires ni la bande passante qui leur est allouée. Dans l'approche proposée, la réservation des ressources est implicite. Les simulations effectuées avec OPNET pour l'évaluation de cette approche montrent des performances acceptables. Ses performances sont largement meilleures (en équité dans le partage des ressources et en robustesse) en comparaison à d'autres algorithmes de contrôle d'accès tels que l'algorithme WFQ (Weighted Fair Queuing).

Hegde et Al. (Hegde, 2007) proposent une nouvelle solution centralisée WM (Wireless Manager) pour la gestion des réseaux locaux sans fil. Cette solution apportée au niveau MAC, permet d'améliorer la qualité de service perçue par les utilisateurs d'un réseau IEEE 802.11b/e. Plusieurs algorithmes sont alors implémentés au niveau du WM pour assurer les objectifs de QoS désirés. L'adaptation dynamique des poids de l'algorithme d'ordonnancement WFQ permet une meilleure équité et utilisation du canal. Une méthode pour l'estimation des débits entre stations et points d'accès avec des mesures de Ping périodiques a été proposée. Un algorithme de contrôle d'accès au médium permet une différentiation de services pour la même catégorie d'accès (AC) IEEE 802.11e. Les auteurs ont aussi proposé un mécanisme de bufferisation pour minimiser les coupures lors d'une application de voix et réduire la dégradation des performances de TCP due aux délais introduit par les handovers. Les simulations et la plate forme d'émulation montrent que les

objectifs fixés ont été atteints. Cette approche peut être améliorée pour des scénarios plus complexes.

Li et Prabhakaran (Li, 2005) présentent une nouvelle méthode de gestion de qualité de service au niveau MAC pour le contrôle d'admission et la réallocation des ressources. Cette méthode permet d'apporter un support de qualité de service pour les applications temps réel en environnements sans fil. Les auteurs s'intéressent à l'ordonnancement des priorités au niveau MAC avec lequel les utilisateurs peuvent s'offrir un niveau de service approprié. En s'échangeant des informations sur l'état du médium sans fils telles que la bande passante disponible ou les délais moyens entre des stations voisines, les utilisateurs du réseau sans fil peuvent assurer un contrôle d'admission basé sur l'état réel du réseau et modifier leurs niveaux de priorités. Cette approche distribuée nécessite une coordination au niveau MAC entre l'ensemble des utilisateurs. Des pénalités, telles que l'allocation des plus faibles priorités, doivent être appliquées aux utilisateurs ne respectant pas les mécanismes proposés. Des simulations ont été effectuées en utilisant l'outil de simulation *ns*. Les résultats montrent que ce cadre proposé permet effectivement une coordination entre l'ensemble des utilisateurs sans fil pour garantir les débits en réservant les ressources nécessaires et en allouant les priorités MAC adéquates.

Korakis et Tassiliulas (Korakis, 2005) proposent un algorithme d'ordonnancement pour la garantie de la qualité de service compatible avec les spécifications IEEE 802.11. Cet algorithme opère au niveau du point d'accès et consiste à mesurer et contrôler les paramètres de l'en tête 802.11e pour le contrôle d'accès durant la période HCF. Cette technique prend en considération l'état du canal radio du moment que des informations sur l'état de ce canal peuvent être obtenues suite aux modifications apportées par le groupe de travail h du standard 802.11. Les simulations effectuées par les auteurs pour l'évaluation de l'approche montrent des performances meilleures par rapport aux techniques ne prenant pas en considération l'état du canal.

Lee et Al. (Lee, 2007) proposent une nouvelle amélioration de la méthode d'accès EDCA du standard 802.11e nommée DS-EDCA (Differentiated Service-EDCA). Un service de priorité est garanti aux trafics à hautes priorités en configurant correctement les paramètres des trafics à faibles priorités. Le service d'équité est assuré en utilisant la technique d'ordonnancement DFS. Les auteurs proposent un modèle de partage hiérarchique du canal radio dans lequel des

ressources plus importante du canal sont allouées aux points d'accès. Les simulations effectuées avec *ns* montrent que la méthode DS-EDCA est plus performante que la méthode EDCA et reste toujours facile à implémenter et compatible avec le standard IEEE 802.11.

5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons défini la problématique de la qualité de service dans les réseaux et en particulier dans les réseaux sans fil. Nous avons ensuite présenté un ensemble de solutions de qualité de service apportées à ces technologies. Les améliorations apportées à la technologie 802.11 ont été détaillées. Le tableau suivant résume l'ensemble des améliorations et leurs principaux avantages et inconvénients.

Tableau 1.4 Comparaison des différentes solutions de qualité de servie

Technique d'amélioration de QoS	Principaux avantages	Principaux inconvénients
DFS	Les performances des trafics à hautes priorités sont améliorées.	Grande complexité d'implémentation
Black Burst	Les délais sont minimisés	Les performances se dégradent si des flux à faible priorité sont présents
VMAC	La différentiation des délais est assurée si un bon choix des paramètres est utilisé	Grande complexité introduite par les interactions nécessaires entre les couches application et MAC
Approche AC	Différentiation et fiabilité de transmission pour différents types de flux	Non efficace dans les environnements bruités. Faibles performances avec TCP
Approche DC	Différentiation assurée entre hautes et faibles priorités	Perte de bande passante si uniquement des stations à faibles priorités sont présentes
PCF avec priorité	Offre une certaine différentiation	Basée sur PCF, inefficace par rapport à DCF
TDMA distribuée	Faible intervention du point d'accès	Basée sur PCF, inefficace par rapport à DCF
Technique de contrôle d'erreurs ARQ	Efficace pour les hauts débits	Larges délais si nombre important de retransmissions à faible débit
Technique de contrôle d'erreurs FEC	Garantit les délais pour les trafics temps réel	Trafic de charge important
IEEE 802.11e	Assure une bonne différentiation entre des trafics de priorités différentes	Ne permet pas d'éviter la saturation du canal Pas de méthode de partage de la bande passante Inefficace si plusieurs flux avec la même priorité sont présents
Approche Gallardo et Al.	Robustesse et meilleure équité dans le partage de ressources	Complexité d'implémentation
Wireless Manager	Bonne équité et meilleure utilisation du canal	Performances non confirmées pour des environnements complexes
Approche de Li et Al.	Garantie de débit avec réservation de ressources	Nécessite une coordination au niveau MAC entre les stations sans fils
Approche de Torakis et Al.	Bonnes performances par rapport à l'IEEE 802.11e	Implémentation difficile : nécessite une information sur l'état du canal
Approche Lee et Al.	Différentiation assurée	Utilise DFS : mauvaises performances pour les flux TCP

Pour synthétiser ces travaux, nous notons tout d'abord que les solutions basées sur la méthode d'accès PCF du standard ne sont pas prometteuses à cause de l'inefficacité démontrée de cette méthode par rapport à la méthode DCF. La plupart des travaux listés ne sont pas compatibles entre eux et s'intéressent plutôt soit aux techniques d'ordonnancement soit aux paramètres d'accès au médium. Outre la difficulté de leurs implémentations, plusieurs propositions restent dépendantes de conditions d'application spécifiques telles que l'étendue du réseau ou la nature des flux présents.

Nous voyons qu'il est intéressant de trouver des solutions avec une vue macroscopique du réseau, des solutions qui considèrent le réseau dans sa globalité. Ces solutions doivent être simplement déployables sur les réseaux réels. Dans cette perspective, nous présentons dans le chapitre suivant une nouvelle approche pour le support de la qualité de service dans les réseaux 802.11. Cette solution peut fonctionner conjointement avec toutes les approches déjà présentées et reste surtout compatible avec le standard 802.11e qui reste jusqu'à nos jours la seule solution normalisée pour l'amélioration de la QoS dans ces réseaux.

Références

Aad, I. et C. Castelluccia (2001). Differentiation mechanisms for IEEE 802.11. IEEE Infocom 2001. Alaska, USA, pp 209-218

Aad, I. et C. Castelluccia (2003). Priorities in WLANs. Computer networks, Vol. 41, N°. 4, pp. 505-526.

Bruno, R., M. Conti et E. Gregori (2007). Design of an enhanced access point to optimize TCP performance in Wi-Fi hotspot networks. Wireless Networks, Vol. 13, pp. 259-274.

Campedel, B. (2005). Les bases de la qualité de service. Contrôle dans les réseaux IP, Hermes, Lavoisier (ISBN: 2-7462-0998-5), pp. 39-64.

Chalmers, D. et M. Solman. A survey of quality of service in mobile computing environment. IEEE Communication Surveys, second quarter 1999.

Chaudet, C. et I. Guérin Lassous (2006). Etat des lieux sur la qualité de service dans les réseaux ad hoc. Conférence Francophone Ingénierie des protocoles, Tozeur, Tunisie, pp. 229-252.

Deng, J. et RS. Chang (1999). A priority Scheme for IEEE 802.11 DCF access method. IEICE Transactions in Communications, 1999, pp 96-102

Egea-Lopez, E., A. Martinez-Sala, J. Vales-Aloso, J. Garcia-Haro et J. Malgosa-Sanahuja (2005). Wireless communications deployment in industry : a review of issues, options and technologies. Computers in Industry, Vol. 56, pp. 29-53.

Gallardo, J.R., P. Medina et W. Zhuang (2007). QoS mechanisms for the MAC protocol of IEEE 802.11 WLANs. Wireless Networks, Vol. 13, pp. 335-349.

Ganz, A., A., Phonphoem et Z. Ganz (2001). Robust superpoll with chaining protocol for IEEE 802.11 wireless LANs in support of multimedia applications. Wireless Networks, Vol. 7, pp. 65-73.

Gast, M. 802.11 Wireless networks : the definitive guide. O'reilly, 2002.

Golestani S.J. (1994). A self-clocked fair queuing scheme for broadband applications. Proceedings of IEEE INFOCOM.

Hegde, M., S.V.R. Anand, A. Kumar et J. Kuri (2007). WLAN manager (WM): a device for performance management of a WLAN. International Journal of Network Management, Vol. 17, pp. 155-170.

Heusse, M., F. Rousseau, G. Berger-Sabbatel et A. Duda (2003). Performance anomaly of 802.11b. IEEE INFOCOM.

IEEE (1998). 802.1D-1998, Part 3 : Media Access Control (MAC) Bridges, ANSI/IEEE Std. 802.1D.

IEEE (1999). Supplement to 802.11-1999. Wireless LAN MAC and PHY specifications: Higher speed Physical Layer (PHY) extension in the 2.4 GHz band.

IEEE (1999). IEEE 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 Physical Layer (PHY) specifications - Amendment 1: High-speed Physical Layer in the 5 GHz band.

IEEE (2001). IEEE 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 Physical Layer (PHY) specifications - Amendment 2: Higher-speed Physical Layer (PHY) extension in the 2.4 GHz band - Corrigendum1.

IEEE (2003a). IEEE 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 Physical Layer (PHY) specifications - Amendment 4: Further Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band.

IEEE (2003b). IEEE Standard for Information technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - LAN/MAN Specific Requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Spectrum and Transmit Power Management Extensions in the 5GHz band in Europe.

IEEE (2003c). IEEE Recommended Practice for Multi-Vendor Access Point Interoperability via an Inter-Access Point Protocol Across Distribution Systems Supporting IEEE 802.11 Operation.

IEEE (2004a). Amendment to IEEE Std 802.11, 1999 Edition (Reaff 2003). IEEE Standard for Information technology - Telecommunications and information exchange between system - Local and metropolitan area networks - Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications - Amendment 6: Medium Access Control (MAC) Security Enhancements.

IEEE (2004b). IEEE 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 Physical Layer (PHY) specifications: Amendment 8: Medium Access Control (MAC) Quality of Service Enhancements.

ISO/IEC CD 13236.2 (1995). Quality of service – framework.

ITU-T Rec. E.800 (1993). Terms and definitions related to quality of service and network performance including dependability.

Jabri, I. et S. Nasri (2003). Une approche d'étude de la dynamique d'un réseau ad hoc avec routage réactif ou proactif. Actes du 10e Colloque Francophone sur l'Ingénierie des Protocoles. Paris, France, 7-10 Octobre 2003, pages 269-284. Hermes Science Publications (ISBN 2-7462-0798-2).

Korakis, T. et L. Tassiliulas (2005). Providing quality of service guarantees in wireless LANs compliant with 802.11e. Computer Networks, Vol. 47, N°. 2, pp. 239-255.

Labiod, H., H. Afifi (2004). De blutooth à Wi-Fi. GET et Lavoisier, Paris, ISBN 2-7462-0813-X.

Lee, J.F., W. Liao et M.C. Chen (2007). A differentiated service model for enhanced distributed channel access (EDCA) of IEEE 802.11e WLANs. Mobile Networks and Applications, Vol. 12, pp. 69-77.

Li, M. et B. Prabhakaran (2005). MAC layer admission control and priority re-allocation for handling QoS guarantees in non-cooperative wireless LANs. Mobile Networks and Applications, Vol. 10, No. 6, pp. 947-959.

Lindgren, A., A. Almquist et O. Schelén (2001). Evaluation of quality of service schemes for IEEE 802.11 wireless LAN's. 26th Annual IEEE conférence. Local Computer Networks, Tampa Florida, Novembre 2001

Malamos, A.G., E.N. Malamas, T.A. Varvarigou et S.R. Ahuja (1999). On the definition, modelling and implementation of Quality of Service (QoS) in distributed multimedia systems. IEEE ISCC, Egypt, 1999.

Mangold, S., S. Choi, G. R. Hiertz, O. Klein et B. Walke (2003). Analysis of IEEE 802.11e for QoS support in wireless LANs. IEEE Wireless Communications, Vol. 10, N°. 6, pp 40-50.

Muhlethaler, P. (2002). 802.11 et les réseaux sans fil. Eyrolles, 2002, ISBN 2-212-11154-1.

Ni, Q. (2005). Performance analysis and enhancements for IEEE802.11e wireless networks. IEEE Network, Vol. , pp 21-27.

Ni, Q., L. Romdhani et T. Turletti (2004). A survey of QoS enhancements for IEEE 802.11 wireless LAN. Journal of wireless communications and mobile computing, Vol. 4, No. 5, pp. 547-566

NS-2 Simulator (2007). http://nsnam.isi.edu/nsnam/index.php/User_Information, date d'accès 2007.

Pries, R., K. Heck, P. Tran-Gia et T. Wirth (2006). QoS traffic in wireless LAN overlapping cells. European Wireless, Athen, Greece.

Sobrinho, J.L. et A.S.Krishnakumar (1996). Real-time traffic over the IEEE 802.11 medium access control layer. Bell labs technical journal, pp. 172-187

Sobrinho, J.L. et A.S.Krishnakumar (1999). Quality of service in ad hoc carrier sense multiple access networks. IEEE journal on selected areas in communications, Vol. 17, No. 8, pp. 1353-1368

Soomro, A. et D. Cavalacanti (2007). Opportunities and challenges in using WPAN and WLAN technologies in medical environments. IEEE Communications Magazine, Vol. 45, No. 2, pp.114-122.

Vaidya, N. H., P. Bahl et S. Gupta (2000). Distributed Fair Scheduling in a wireless LAN. 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (Mobicom 2000), Boston, USA, August 2000, pp. 167-178

Veres, A., AT. Campbell, M. Barry et LH. Sun (2001). Supporting service differentiation in wireless packet networks using distributed control. IEEE Journal of Selected Areas in Communications, special issue on mobility and resource management in next generation wireless systems, Vol. 19, No. 10, pp. 2094-2104

Vogel, A., B. Kerhervé, G.V. Bochmann et J. Gecsei (1995). Distributed multimedia and QoS – a survey-. IEEE Multimedia, Vol. 2, No. 2, pp. 10-19.

Zhu, H., M. Li, I. Chlamtac et B. Prabhakaran (2004). A survey of quality of service in IEEE 802.11 networks. IEEE Wireless Communications, special issue mobility and ressource management, Vol. 11, No. 4, pp. 6-14.

Chapitre 2

Equilibrage de charges pour la gestion de la qualité de service

1. Introduction

L'étude des travaux de recherche sur le support de la qualité de service dans les réseaux sans fil IEEE 802.11 présentée dans le premier chapitre montre qu'il y a toujours beaucoup de travail à faire dans ce domaine. En effet, en plus de la difficulté de leurs implémentations, ces travaux restent généralement incompatibles entre eux et focalisent essentiellement sur les paramètres d'accès au niveau MAC et les techniques d'ordonnancement. Aucun de ces travaux n'a pris en compte la topologie du réseau sans fils. Dans ce chapitre nous nous plaçons dans le cadre des réseaux 802.11 publics communément nommés « Hotspots ». Le déploiement de la technologie 802.11 est de plus en plus intense. Nous nous intéressons à l'amélioration de la qualité de service dans le contexte particulier où les applications sont exigeantes en termes de débit, délai, gigue,…. Pour ces réseaux, nous présentons une nouvelle approche d'équilibrage de charge entre les points d'accès. Cette approche, qui considère le réseau dans sa globalité, vise à améliorer les performances globales et garantir ainsi un support minimal de qualité de service aux utilisateurs.

Nous allons commencer par présenter les motivations qui nous ont poussés à l'adoption de cette approche. Ensuite nous décrivons quelques travaux passés sur l'équilibrage de charge dans les réseaux sans fils. Nous présentons ensuite notre contribution et le progrès qu'elle amène.

2. Motivations

L'idée de base pour l'adoption d'une approche d'équilibrage de charge pour les réseaux locaux sans fils s'est manifestée suite à la synthèse approfondie des travaux de recherche effectuées au CRAN (Centre de Recherche en Automatique de Nancy) pour la conception des réseaux Ethernet industriels (Krommenacker, 2002) (Rondeau, 2001). Le contexte était d'utiliser les réseaux Ethernet non déterministes pour acheminer des applications industrielles à fortes contraintes temporelles. Le problème est qu'Ethernet dispose d'un délai d'accès au médium non déterministe menant à un comportement temporel imprévisible (Decotignie, 2001). En plus des solutions d'ordre technologique consistant à surdimentionner le réseau, plusieurs solutions ont été proposées afin d'assurer l'adaptation du réseau Ethernet aux environnements industriels contraints :

- élimination des collisions par la modification de la méthode d'accès au support
- adaptation de l'algorithme de résolution de collisions de la méthode d'accès CSMA/CD pour résoudre les collisions d'une façon déterministe.
- Régulation du trafic pour éviter les collisions en éliminant les fluctuations d'arrivée de messages.

Cependant, les nouvelles architectures commutées permettent de dédier le médium et de réduire les domaines de collision (Thomas, 2000). Un choix judicieux des segments connectés à un commutateur permet même d'éliminer les problèmes liés aux collisions. Un réseau Ethernet full-duplex construit à partir de commutateurs avec les techniques de microsegmentation semble approprié à une utilisation en milieu industriel. Cependant, les problèmes de collision se transforment en problèmes de congestion au niveau des commutateurs (Krommenacker, 2002). La garantie d'un délai de bout en bout maximal devient alors difficile. La solution adoptée dans (Krommenacker, 2002) est de prendre en compte les aspects applications qui génèrent les trafics. Ces travaux proposent d'étudier les échanges entre les différents nœuds du réseau dans l'objectif de déterminer la meilleure organisation d'architecture physique de communication. Les travaux de Krommenacker démontrent que l'optimisation de l'architecture topologique du réseau Ethernet commuté permet de rationaliser les échanges, limiter les congestions et conduire à un respect des exigences, en termes de qualité de service, imposées par les applications temps réel (délai de bout en bout et fiabilité). Ces constatations sur les réseaux Ethernet nous ont mené à poser la question suivante : serait il possible, dans le cadre des réseaux publics sans fils IEEE 802.11, d'apporter un support de qualité de service par l'organisation topologique de ces réseaux ?

Afin d'avoir les éléments de réponse au moins préliminaires à cette question, il était nécessaire de commencer par une étude des besoins des utilisateurs et du comportement du réseau dans le contexte des Hotspots. Nous nous sommes alors penchés sur un ensemble de travaux qui s'intéressaient à cette question.

2.1. Etude de situations réelles

Tang et Baker (Tang, 2000) ont analysé le réseau local sans fils du département informatique de l'université de Stanford. Ce réseau est constitué de 74 utilisateurs (chercheurs, étudiants, administratifs et 3 robots) qui partagent 12 points d'accès connectés à travers Ethernet à un routeur et répartis sur l'ensemble d'un bâtiment de 6 étages. Les points d'accès possèdent deux interfaces sans fils : une interface WaveLAN à 2 Mbps et une autre interface IEEE 802.11 à 11 Mbps. Les auteurs récupèrent des traces pendant 12 semaines, en utilisant *tcpdump* pour enregistrer les en-têtes des paquets passant par le routeur. Ils utilisent aussi SNMP pour envoyer des requêtes du routeur vers l'ensemble des points d'accès toutes les 2 minutes. Ces requêtes permettent de connaître les utilisateurs connectés, leurs emplacements, etc. Les résultats récupérés suite à cette étude montrent, entre autre, que la plupart des utilisateurs sont stationnaires c'est-à-dire qu'ils ne bougent pas au cours des sessions même si quelques utilisateurs sont fortement mobiles. La bande passante consommée augmente généralement avec le nombre d'utilisateurs. Des pics, de durée limitée dans le temps jusqu'à 5,6 Mbps sont observés. Dans 80% des pics observés, 94% du trafic est généré par un seul utilisateur et une seule application. Pour les pics supérieurs à 3,6 Mbps, 60% du trafic est dirigé de l'extérieur vers l'intérieur du réseau. Les auteurs concluent que l'optimisation du traitement des paquets est aussi importante que l'optimisation de l'utilisation de la bande passante.

Pour **Kotz et Essien** (Kotz, 2002), comprendre l'usage et les problématiques des réseaux locaux sans fil est critique pour ceux qui développent, utilisent et gèrent les réseaux sans fil, comme d'ailleurs pour ceux qui développent des applications sur des réseaux sans fil. Pour ce faire, les auteurs ont récupérés pendant onze semaines, l'activité de presque 2000 utilisateurs dans un campus universitaire. Le réseau étudié comporte 476 points d'accès répartis sur 161 bâtiments. Cette étude reprend celle effectuée par Tang et Baker pour une population significativement plus étendue. Les résultats obtenus montrent que le trafic web (port http) constitue la fraction la plus importante de l'ensemble du trafic dans le réseau. La majorité des utilisateurs se connectent à un ensemble limité de points d'accès. Les auteurs ont été surpris

par le nombre de situations dans lesquelles les cartes passent excessivement d'un point d'accès à un autre sans être capable de se fixer en permanence à un seul. Ils remarquent que le taux d'activité est très variable entre les différents bâtiments mais aussi entre les différents points d'accès.

L'objectif des travaux effectués par **Balachandran et Al.** (Balachandran, 2002a) est de comprendre le comportement des utilisateurs et les performances du réseau public sans fils par l'analyse de traces récupérées au cours d'une conférence. Ceci permettra de fournir un modèle paramétré à utiliser dans des études analytiques et par simulation. Parmi les résultats fournis par cette étude, il est à noter que pour un ensemble d'applications s'exécutant sur le réseau, les besoins individuels des différents utilisateurs en terme de bande passante moyenne ou maximale sont faibles. La distribution de la charge n'est pas du tout équilibrée entre l'ensemble des points d'accès. En plus, il n'y a pas de corrélation entre la charge d'un point d'accès et le nombre d'utilisateurs qui lui sont associés. Les auteurs concluent que les algorithmes d'équilibrage de charge existants, qui considèrent uniquement le nombre d'utilisateurs qui sont associés aux différents points d'accès, ne sont pas performants. Ces algorithmes doivent plutôt se baser sur les besoins en bande passante de chaque utilisateur. Cette étude, malgré quelques similarités avec d'autres travaux, reste spécifique au contexte d'une conférence.

Quant à **Balazinska et Castro** (Balazinska, 2003), ils ont effectué une analyse des traces de trames récupérées pendant 4 semaines de la part de 1366 utilisateurs d'un réseau public sans fils connectant 3 bâtiments d'un campus universitaire. Les auteurs remarquent que le nombre de jours durant lesquels chaque utilisateur se connecte au réseau est très variable. Le nombre d'utilisateurs se connectant pendant un jour donné ou une heure donnée est pratiquement stable. La charge est distribuée inégalement entre les différents points d'accès du réseau (il y a 131, 36 et 10 points d'accès placés respectivement dans le 1er, le 2ème et le 3ème bâtiment). Pour quelques uns de ces points d'accès le nombre d'utilisateurs simultanément associés est supérieur à 30. Un nombre limité d'utilisateurs génèrent la portion la plus importante du trafic. Pour 30% des points d'accès, 10% des utilisateurs génèrent plus de 40% du trafic total généré. Par contre, le trafic généré au niveau de chaque point d'accès est peu dépendant du nombre d'utilisateurs associés. Les auteurs ont utilisé les résultats obtenus pour fournir un modèle de mobilité des utilisateurs dans un réseau local sans fil en se basant sur deux paramètres : prévalence (mesure le pourcentage de temps d'association à un point d'accès) et

persistance (mesure le temps pendant lequel un utilisateur est associé à un point d'accès). Le modèle établi montre une faible mobilité des utilisateurs entre les différents points d'accès mais aussi que ces utilisateurs continuent à utiliser les mêmes applications. La plupart des utilisateurs de ce réseau se connectent avec des ordinateurs portables et leur comportement pourra être différent si d'autres types d'équipements sont utilisés (PDA,…).

Henderson et Al. (Henderson, 2004) ont repris les analyses effectués dans (Kotz, 2002) sur un réseau sans fil d'un campus universitaire élargi (7000 utilisateurs avec 550 points d'accès). Cette nouvelle analyse du réseau montre une incroyable augmentation de l'utilisation du réseau sans fil et un changement de la nature des applications et des équipements utilisés. La mobilité des utilisateurs reste toujours limitée. Un phénomène de changement fréquent du point d'accès est observé pour quelques utilisateurs. Les utilisateurs, les équipements et les applications ont des caractéristiques différentes en termes de mobilité. En plus de l'augmentation considérable des applications Peer-to-Peer, des applications de voix sur IP (VoIP) apparaissent dans le réseau sans fil. Ces applications se déroulent sur des sessions courtes laissant penser à des difficultés d'acheminement possibles sur le réseau sans fil.

Dans des études plus récentes de réseaux publics sans fil, les auteurs de **(Ojala, 2005)** ont observé un réseau sans fil public pendant une période de 14 mois. Le réseau est situé en Finlande et est partagé entre 110000 utilisateurs de 4 « opérateurs ». Les résultats obtenus montrent, en plus des conclusions sur la répartition du trafic au cours des mois, semaines, jours et heures de la journée, la faible mobilité des utilisateurs. La plupart des utilisateurs se connectent à 80% du temps au même point d'accès. Moins de 10% de l'ensemble des sessions concerne des utilisateurs qui se déplacent sur des distances supérieures à 50 m.

Jardosh et Al. (Jardosh, 2005) utilisent une technique de sniffing en voisinage (Yeo, 2004) pour analyser l'activité au niveau liaison d'un réseau sans fils IEEE 802.11b. Ce réseau supporte les connexions des 1138 participants à une conférence. 38 points d'accès comportant chacun 3 points d'accès virtuels (1 AP par canal) actifs (parmi 4) sont répartis sur trois étages adjacents. Les résultats montrent que 90% du trafic acheminé sur le réseau est assuré par seulement 10 points d'accès. La quantité totale de trafic acheminé est équitablement répartie sur chacun des canaux actifs (canaux : 1, 6 et 11). Au niveau de chaque point d'accès, le trafic n'est pas équitablement distribué sur les trois canaux. Un algorithme d'équilibrage de charge s'exécute au niveau de chaque point d'accès pour changer dynamiquement les canaux. Les

auteurs montrent qu'une transmission à faible débit de courtes trames s'effectue avec un taux de pertes meilleur qu'une transmission de longues trames à de hauts débits. Les auteurs concluent, qu'en ayant des informations fiables sur l'état du réseau, les stations sans fil et les points d'accès peuvent coopérer pour une meilleure utilisation de la bande passante disponible.

2.2. Synthèse des études sur les situations réelles

D'autres travaux de recherche ont été et sont encore réalisés pour l'étude des réseaux publics sans fils dans des contextes différents (Aguayo, 2004), (Chinchilla, 2004), (Meng, 2004), (Raniwala, 2004), (Blinn, 2005), etc. A partir de l'ensemble de ces études nous tenons à souligner les points suivants :

- Les réseaux sans fil à usage public sont de plus en plus déployés. Ces réseaux permettent de connecter au réseau Internet un nombre important d'utilisateurs.
- les réseaux publics sans fil deviennent une vraie alternative pour les réseaux filaires. Beaucoup d'applications s'exécutant sur le réseau filaire migrent vers la boucle locale sans fils. De nouvelles applications telles que le vidéo streaming, la voix sur IP sont en plein essor dans les hot spots sans fil.
- Dans un hot spot, une planification lors de la mise en place des points d'accès s'avère nécessaire : nombre d'AP, positions des AP,…
- Certains points d'accès du réseau sont beaucoup plus chargés que d'autres. Ceci n'est généralement pas dû au nombre d'utilisateurs associés au point d'accès : une technique d'équilibrage des charges entre les différents points d'accès du hot spot permettra d'améliorer les services offerts aux utilisateurs (disponibilité, bande passante, délais, taux de perte,…). La mise en place d'une telle technique est possible du moment que le besoin en bande passante de chacune des applications n'est pas élevé, on peut avoir un nombre assez important d'applications pour chaque AP.
- L'équilibrage de charge est intéressant s'il est basé sur la charge de chaque utilisateur et non pas uniquement le nombre d'utilisateurs connectés à chaque point d'accès. La mise en place d'une telle technique nécessite l'échange d'une information complète sur les besoins des utilisateurs au moment des connexions et la variation de ces besoins au cours des sessions.

Avant de présenter notre approche, nous allons étudier dans le paragraphe suivant un ensemble de travaux de recherche et des solutions industrielles portant sur l'équilibrage de charge dans les réseaux sans fils IEEE 802.11.

3. Travaux reliés

Durant ces dernières années, des travaux de recherche se sont intéressés à l'équilibrage de charges dans les réseaux sans fils 802.11.

3.1. Travaux de Sheu et Al.

Sheu et Al. (Sheu, 1999) proposent de changer la méthode d'association du standard IEEE 802.11 qui se base sur un indicateur de puissance du signal reçu. Selon les auteurs, la méthode du standard peut entraîner l'attachement d'un nombre élevé de stations mobiles à un nombre limité de points d'accès et donc une augmentation des contentions et par suite du nombre de collisions dans les cellules surchargées. Une dégradation des performances globales du réseau sera alors observée. Par contre, si les stations sont équitablement distribuées sur tous les points d'accès et que la puissance du signal entre chaque station et point d'accès est maintenue au dessus d'un seuil acceptable, la bande passante du réseau sans fil sera utilisée efficacement. Les auteurs proposent un algorithme DLBA (Dynamic Load Balance Algorithm) permettant de distribuer équitablement les stations mobiles sur les différents points d'accès en maximisant la valeur moyenne du RSSI (indicateur de la puissance du signal) sur la totalité du réseau. Cette approche d'équilibrage de charge consiste à trouver une solution qui maximise la valeur moyenne du RSSI et minimise la variance du nombre des stations associées et la variance de la valeur moyenne du RSSI pour l'ensemble des points d'accès. Suite à l'envoi d'une trame Probe Request par une station STA_y entrant dans le réseau, chaque point d'accès AP_x à l'écoute doit répondre par une trame Probe Response contenant deux informations supplémentaires : R_{xy} (la valeur de RSSI entre AP_x et STA_y) et AR_x (la valeur moyenne de RSSI dans la cellule couverte par AP_x). A la réception de toutes les réponses, la station décide du point d'accès auquel elle va s'associer. Ce point d'accès sera celui qui maximise la différence entre R_{xy} et AR_x. Suite à une nouvelle association, les stations avec un RSSI inférieur à la valeur moyenne doivent changer de BSS, dans la limite d'un nombre maximal de handoff. L'inconvénient de cette approche est qu'elle considère que la charge du trafic est la même pour toutes les stations. L'indicateur de la puissance du signal reçu, même calculé en valeur moyenne, n'est pas nécessairement une bonne indication de performance.

3.2. Travaux de Papanikos et Logothetis

Dans le même objectif d'équilibrer les charges entre les points d'accès et d'améliorer ainsi les performances globales du réseau, Papanikos et Logothetis (Papanikos, 2001) proposent deux nouveaux algorithmes. Le premier algorithme consiste à faire distribuer les points d'accès, si leur nombre est faible, sur les différents canaux de la couche physique. Quand leur nombre est important, les points d'accès partageront les mêmes canaux. Pour le partage des canaux l'algorithme prend en compte la position des points d'accès et la puissance du signal (RSSI) reçu des points d'accès voisins. A l'activation d'un point d'accès, le protocole IAPP (Inter Access Point Protocol), initialement développé pour faciliter le roaming, sera utilisé pour lui transférer des informations sur les points d'accès du même réseau. Le nouvel AP lancera ensuite un scan pour détecter ceux qui lui sont voisins et leurs canaux respectifs. Ceci lui permettra de se positionner sur le canal adéquat, offrant le minimum d'interférences avec les cellules voisines. Cette auto-sélection s'avère selon les auteurs une étape initiale qui sert à "normaliser" le réseau. Ils indiquent qu'aucun constructeur n'implémente actuellement cette fonction d'auto-sélection du canal. Le second niveau consiste à distribuer les stations mobiles sur les différents points d'accès non pas en se basant uniquement sur l'indicateur de puissance du signal reçu mais aussi en fonction du nombre de stations associées au point d'accès et d'autres mesures de la qualité du lien. Les auteurs proposent aussi de nouvelles primitives entre station et point d'accès nécessaires à l'implémentation de la procédure d'équilibrage proposée. Pour améliorer les solutions proposant des algorithmes d'équilibrage de charge, difficiles à implémenter, se basant uniquement sur la valeur moyenne du RSSI, les auteurs proposent un deuxième algorithme qui se base en plus sur le nombre de stations mobiles associées à chaque point d'accès. En utilisant des informations supplémentaires récupérées à partir des points d'accès, chaque station mobile doit choisir le meilleur point d'accès auquel elle va s'associer. Les informations, intégrées dans les trames *Probe Response* envoyées par chaque AP, sont : N*i* (le nombre de stations associées au point d'accès AP*i*), S*i* (la valeur de RSSI pour la trame *Probe Request* reçue par AP*i*) et M*i* (la valeur moyenne de RSSI de toutes les stations associées à AP*i*). A la réception de ces informations de chaque point d'accès AP*i*, la station calcule une fonction W*i*. Elle doit s'associer au point d'accès maximisant cette fonction. Les auteurs proposent une supervision continue du lien sans fils afin de mettre à jour les valeurs récupérées (N*i*, S*i* et M*i*). Une station doit incrémenter un compteur de handover chaque fois que la fonction W*i* n'est plus maximisée par l'AP auquel elle est associée. Quand ce compteur atteint un certain seuil, la station doit changer de point d'accès. Les simulations

effectuées par les auteurs montrent une distribution équilibrée des stations sans fils et une meilleure performance globale du réseau. Cependant, cette approche ne considère pas les besoins en qualité de service de chacun des utilisateurs. Cette approche reste non adaptée au contexte des Hotspots puisque les demandes des applications sont très différentes. Les auteurs ne montrent pas la configuration des simulations effectuées pour l'évaluation des performances.

3.3. Travaux de Hsiao et Al.

Quant à Hsiao et Al. (Hsiao, 2001) ils décrivent des algorithmes pour un accès multi sauts au réseau sans fils. Un nœud doit chercher un chemin optimal vers le nœud le connectant au cœur du réseau. Ce chemin doit respecter la QoS demandée par le nœud. Dans ce travail les auteurs n'ont pas pris en compte la variation de la charge du réseau en fonction des nœuds entrant et sortant du réseau. Cette approche d'équilibrage de charge reste inadaptée au contexte des Hotspots où les utilisateurs sont généralement à un seul saut par rapport aux points d'accès.

3.4. Travaux de Balachandran et Al.

Balachandran et Al. (Balachandran, 2002b) s'intéressent à un équilibrage de charge pour des réseaux publics sans fils. Partant des constatations sur le comportement des utilisateurs et les performances du réseau, les auteurs proposent des nouvelles techniques pour éviter les congestions au niveau de quelques points d'accès d'un hot spot. Ceci est assuré par une adaptation dynamique aux besoins des utilisateurs, la garantie d'une bande passante minimale pour les utilisateurs et une optimisation du fonctionnement du réseau pour une meilleure utilisation des ressources. Une négociation entre les utilisateurs et le réseau sur la bande passante à utiliser sera introduite dans l'approche proposée. Balachandran et Al. supposent que le réseau et l'ensemble des utilisateurs doivent explicitement coopérer pour s'adapter aux changements des conditions de charge (qui changent avec l'emplacement des utilisateurs). Quand un utilisateur demande une connexion au réseau, avec un service donné, auprès d'un point d'accès surchargé, le réseau essaye de s'adapter pour répondre à la requête de l'utilisateur en ajustant les charges des différents points d'accès. Si ceci est impossible, le réseau fournit à l'utilisateur les coordonnées d'un emplacement où il pourra avoir le service demandé. Les utilisateurs peuvent avoir la qualité de service demandée soit d'une façon transparente ou en se déplaçant explicitement dans l'espace couvert par le réseau. Pour atteindre leurs objectifs, les auteurs proposent d'établir un contrat de niveau de service (SLA)

explicitement avec chaque utilisateur. Ce contrat doit être établi au début de l'offre de service mais aussi chaque fois que les utilisateurs se déplacent à l'intérieur du réseau. Chaque utilisateur doit avancer une spécification du niveau de service demandé (SLS). Deux paramètres sont alors avancés : la bande passante minimale et maximale. Pour aider les utilisateurs dans la formulation de leurs demandes, une information sur la capacité du réseau est périodiquement diffusée au niveau de chaque cellule. Pour la négociation et le contrôle d'admission des utilisateurs, les auteurs ont choisi une solution centralisée. Ces opérations sont donc effectuées par un serveur de contrôle d'admission (ACS). Ce serveur reçoit et traite les demandes SLS des différents utilisateurs. L'utilisation d'un serveur de contrôle d'admission permet de garder une information complète sur l'ensemble du réseau et des utilisateurs pour une meilleure optimisation. Cette solution centralisée permet d'éviter d'implanter des fonctionnalités supplémentaires au niveau des points d'accès ni d'implanter une communication entre les points d'accès. La solution centralisée permet aussi de faciliter le roaming des stations entre les APs : leurs demandes en QoS peuvent être diffusées à l'avance par le serveur d'accès central. La demande SLS est exprimée dans une trame d'authentification. Les auteurs n'indiquent pas comment cette trame est acheminée de l'utilisateur vers le serveur (à travers quel point d'accès elle passe ?). En plus du nom d'utilisateur et du mot de passe, l'utilisateur donne la bande passante minimale, la bande passante maximale et la liste des points d'accès à proximité. Le serveur cherche d'abord les points d'accès pouvant offrir la bande passante minimale demandée puis celui qui peut fournir le maximum de bande passante (dans la limite de la bande passante maximale demandée). Le serveur répond à l'utilisateur par une trame contenant le nom du point d'accès et la bande passante maximale allouée. Si aucun point d'accès ne peut répondre à ces conditions, le serveur ordonne à l'utilisateur un service de roaming. Les coordonnées d'un nouvel emplacement seront envoyées dans la trame de réponse. Une fois associé à un point d'accès, un utilisateur continue à surveiller le canal en comptant le nombre de retransmissions effectuées. A partir d'un certain seuil, une nouvelle négociation avec le serveur est obligatoire. Pour l'évaluation de cette approche, Balachandran et Al. utilisent un index β.

$$\beta = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} B_i\right)^2}{n \times \sum_{i=1}^{n} B_i^{\,2}}$$

avec n, le nombre de points d'accès se chevauchant,

B_i, la charge d'un point d'accès AP_i.

La valeur de cet index tend vers 1 lorsqu'il y a une bonne distribution de la charge entre les points d'accès, à l'exécution des algorithmes. Bien que cette solution soit relativement meilleure par rapport aux précédentes approches, des inconvénients restent importants :
Les auteurs n'ont pas présenté les détails de l'architecture générale du système d'équilibrage. L'emplacement du serveur exécutant la fonction d'équilibrage dans cette architecture et les interactions entre le serveur et les points d'accès ne sont pas définis. Les techniques implémentées ne sont pas totalement transparentes aux utilisateurs du réseau. La solution proposée à une station donnée peut être de changer son emplacement physique. Nous voyons qu'une telle demande pour l'utilisateur reste toujours désagréable. Les deux techniques proposées manquent de flexibilité, elles ne peuvent agir que sur la station demandant connexion. Mis à part cet inconvénient, nous remarquons que cette approche peut toujours mener vers des points d'accès plus chargés que d'autres. En effet, la méthode de négociation ne prend pas en compte la différence entre les charges des points d'accès : on peut toujours associer une station à un point d'accès relativement chargé par rapport aux autres tant que celui-ci est capable de satisfaire les besoins de l'utilisateur. Nous constatons aussi qu'après un certain nombre de connexions, c'est plutôt un service de roaming (changement explicite d'emplacement) qui sera offert aux nouveaux utilisateurs. Pour une meilleure performance de l'algorithme, l'index de charge β aurait pu être utilisé pour la mise en place de l'équilibrage et non pas juste pour son évaluation.

3.5. Travaux de Bajerano et Al.

Bajerano et Al. proposent dans (Bajerano, 2004a) une solution algorithmique pour déterminer les associations entre les utilisateurs et les points d'accès permettant une équité d'allocation de bande passante entre les utilisateurs (max-min fair bandwidth allocation). Cet équilibrage prend en compte les liens sans fil et les liens filaires du système de distribution. Les auteurs supposent que chaque utilisateur peut surveiller la qualité du canal et la transmettre à un centre du contrôle du réseau. Ce dernier détermine et met à jour les associations entre les utilisateurs et les points d'accès. Le modèle établi par les auteurs pour la formulation du problème permet d'avoir une première solution optimale où chaque utilisateur peut être associé à plusieurs points d'accès. Des techniques d'ordonnancement permettent de choisir une solution finale associant chaque utilisateur à un seul AP. La simulation des algorithmes sophistiqués proposés montre, d'après les utilisateurs, un équilibrage de charge et une équité max-min entre les utilisateurs. Dans d'autres travaux (Bejerano, 2004b), une architecture

centralisée de gestion de réseau sans fils dénommée MiFi est présentée. Cette technique permet d'améliorer la QoS pour les applications temps réel en améliorant le mode PCF dans le cas des Hotspots. Elle permet de partager la période sans contention entre des groupes de points d'accès. Les points d'accès du même groupe, qui sont activés simultanément, sont des points d'accès n'interférant pas ensemble. Des slots plus larges sont affectés aux points d'accès plus chargés.

3.6. Travaux de Raniwala et Chiueh

Raniwala et Chiueh (Raniwala, 2004) proposent une procédure pour un meilleur déploiement des réseaux sans fils publics. Cette procédure présente des solutions pour le placement des points d'accès, la taille des cellules, l'affectation des canaux,…. Pour les auteurs il est aussi nécessaire d'équilibrer les charges entre les points d'accès du réseau. Il est nécessaire de considérer la charge du trafic des points d'accès au cours des associations. La prise en compte uniquement de la puissance du signal reçu mène à des situations de déséquilibre. Pour les auteurs, la technique d'équilibrage de charge lors des associations devient inefficace si les utilisateurs modifient leurs comportements et leurs trafics. Une technique plus efficace devra pouvoir réassocier les utilisateurs sans fil d'une façon dynamique au cours de leurs communications. Un tel mécanisme doit être capable de forcer la réassociation d'un utilisateur d'un point d'accès à un autre sur une simple information sur la charge de son trafic. Ceci est possible d'autant plus que sur un réseau public, les BSSs définis par les points d'accès se recouvrent typiquement dans 30% de l'espace total couvert par le réseau. Les auteurs donnent plusieurs propositions. Une première proposition serait d'affecter séparément des utilisateurs à hauts débits, d'autres à faibles débits à des points d'accès différents. Une autre proposition est de contrôler d'une façon dynamique les puissances de transmission des points d'accès. Quand un point d'accès est surchargé, les points d'accès voisins doivent augmenter leurs puissances de transmission permettant ainsi de prendre en charge des stations mobiles initialement connectées au premier point d'accès. Cette solution peut être mise en œuvre par l'utilisation de plusieurs antennes directionnelles au niveau de chaque point d'accès contrôlées indépendamment. Pour forcer un utilisateur à changer de point d'association, il faut juste réduire la puissance d'émission du point d'accès initial sur le secteur correspondant. Cette technique a été partiellement proposée par Brickley et Al. (Brickley, 2005).

3.7. Travaux de Brickley et Al.

Brickley et Al. présentent une approche d'équilibrage de charge dans les réseaux sans fils IEEE 802.11e. Ils indiquent que les points d'accès doivent surveiller le taux de pertes pour les applications vidéo et voix. Si l'une de ces valeurs atteint un certain seuil, une redistribution des utilisateurs sera nécessaire. Ceci est effectué par un changement de la puissance de transmission des points d'accès à antennes omnidirectionnelles. Cette approche reste inefficace dans la mesure où la position exacte des stations mobiles est non détectable. Ceci peut mener à des situations imprévues.

3.8. Travaux de Tsai et Lien

Un algorithme d'équilibrage de charge amélioré (ELB) a été proposé par Tsai et Lien (Tsai, 2003). Les auteurs répartissent les stations en trois classes de services avec des limitations en termes de bande passante pour chaque classe. Un facteur de satisfaction SA est défini comme étant le rapport entre la bande passante utilisée et la bande passante limite (maximale). Un point d'accès doit surveiller périodiquement le trafic sur le réseau. Si la charge du point d'accès dépasse un certain seuil ou que le facteur de satisfaction devient inférieur à un certain seuil, il doit initier une procédure d'équilibrage de charges avec les autres points d'accès. La procédure consiste à déplacer en premier lieu les stations à faible charge. Pour la continuité des services lors des roaming, un mécanisme de réservation de bande passante sur les points d'accès voisins est utilisé. Tsai et Lien n'ont pas présenté de détails sur l'implémentation de leur approche. Dans leur algorithme d'équilibrage, il nous semble qu'il y a encore plusieurs questions qui se posent. Par exemple, le choix de bouger les stations les moins chargées lors de l'équilibrage peut conduire à un nombre élevé de réassociations.

3.9. Travaux de Zhao et Al.

Zhao et Al. (Zhao, 2007) proposent une approche d'équilibrage de charge plutôt dans le contexte des réseaux maillés étendus (Mesh Networks). Les points d'accès du réseau ne sont pas forcément connectés au système de distribution. Ils peuvent être connectés à d'autres points d'accès à travers le lien sans fils. La procédure d'équilibrage consiste à trouver la route adéquate pour atteindre le cœur du réseau. Un routage considérant les besoins en QoS des utilisateurs est donc utilisé. Les techniques implémentées dans ce routage restent loin du contexte du réseau public.

3.10. Travaux de Velayos et Al.

Les travaux présentés par Velayos, Aleo et Karlsson dans (Velayos, 2004) argumentent une architecture complètement distribuée pour l'équilibrage de charge dans le réseau sans fil. Pour les auteurs, l'architecture centralisée présentée dans (Balachandran, 2002a) a plusieurs inconvénients. Un agent LBA (Load Balancing Agent) est installé dans chaque point d'accès du réseau. Cet agent diffuse périodiquement sur le système de distribution le niveau de charge de l'AP correspondant. Un LBA peut alors décider du niveau de charge de son AP. Un AP surchargé n'accepte pas l'association des stations sans fils et force le roaming des stations qui lui sont associées. Un AP équilibré peut uniquement accepter l'association de nouvelles stations entrant dans le réseau. Un AP sous chargé peut accepter à la fois les nouvelles stations entrant dans le réseau et les stations effectuant des handovers. La métrique de charge utilisée par les auteurs est la bande passante de chaque point d'accès. L'index d'équilibrage de charge β (défini précédemment) est utilisé pour quantifier l'équilibrage entre les points d'accès voisins. Ce paramètre n'est pas utilisé pour déterminer l'état de charge des APs.

Un paramètre δ est défini par les auteurs. Ce paramètre permet de réduire le nombre de réassociations à effectuer. Les points d'accès considérés comme étant surchargés sont uniquement ceux dont la charge est supérieure à un niveau L, définit par les auteurs (L est la charge moyenne du réseau), auquel est rajouté la valeur de δ

$$L = \frac{\sum_{i=1}^{n} B_i}{n}$$

- n, le nombre de points d'accès,
- B_i, la charge d'AP_i.

Un point d'accès surchargé sélectionne une station à dissocier. Pour la forcer, le point d'accès envoie alors une requête de dissociation (n'existe pas dans le standard). La station cherchera à s'associer à un autre point d'accès. Seuls les points d'accès sous chargés accepteront sa demande d'association. Un nouvel état de charge sera par la suite diffusé et une nouvelle itération peut se produire.

Nous remarquons plusieurs inconvénients dans cette approche. Les auteurs n'ont pas donné le fonctionnement de l'approche pour un large réseau sans fils (avec plusieurs points d'accès) : les simulations ont été effectuées sur une configuration à uniquement deux points d'accès. La technique proposée ne peut agir que localement entre des points d'accès pour lesquels on veut équilibrer les charges. D'ailleurs, le paramètre L définissant l'état de charge d'un point

d'accès quelconque n'est calculé que pour des AP voisins. L'exécution de l'algorithme peut conduire à un nombre important de dissociations et associations successives pour arriver à un état d'équilibre. Ceci entraîne un gaspillage de temps important. En plus la politique de sélection des stations à déplacer n'optimise pas le nombre d'itérations de la technique.

3.11. Propositions industrielles et normalisation

Notons aussi qu'en plus de ces différents travaux de recherche présentant des approches pour l'équilibrage de charges dans les réseaux publics 802.11, des propositions de produits « avec équilibrage de charges » émergent des constructeurs de matériel réseau sans fils. Le point d'accès « ORiNOCO AP-2000 » du fabricant Proxim wireless networks permet un équilibrage de charge. Sur son « white paper », il est indiqué que ce point d'accès permet de rediriger les clients IEEE 802.11b (les cartes de type Agere) aux points d'accès les moins chargés en fonction de la bande passante actuelle (Proxim, 2007). Mais aucune indication sur les techniques utilisées, ni le niveau d'équilibrage effectué n'est révélée. Cisco (Cisco, 2007) a proposé un système centralisé pour la gestion des réseaux sans fils. Un contrôleur central permettra de gérer un ensemble de point d'accès *légers*. La communication entre les points d'accès et le contrôleur s'effectue par un nouveau protocole LWAPP (Lightweight Access Point Protocol). Ce protocole a été initialement élaboré par Airespace puis racheté par Cisco. L'architecture proposée permet entre autres de faciliter la configuration de réseau, d'alléger les traitements effectués par les APs, de renforcer les fonctions de sécurité, de qualité de service…Le constructeur parle aussi d'équilibrage de charge (adaptation de la puissance du signal) mais toujours sans aucun éclaircissement sur les techniques utilisées.

Depuis 2005, l'IETF travaille sur un nouveau standard CAPWAP (Control and Provisioning of Wireless Access Points) (IETF, 2007). Le modèle LWAPP a été retenu comme base du standard. Le protocole qui définit les fonctionnalités d'un point d'accès sera issu de LWAPP, tandis que les autres composants tels que le protocole de communication et les spécifications de sécurité seront remodelés.

3.12. Synthèse des travaux reliés

Mise à part la capacité de travaux précédemment présentés à assurer un certain niveau d'équilibrage de charge dans les réseaux sans fils, ils présentent un certains nombre d'inconvénients. Dans le tableau suivant, nous présentons pour chacun des travaux les paramètres qui sont utilisés pour l'équilibrage et les principaux inconvénients.

Tableau 2.1

Technique	Paramètres utilisées pour	Principaux inconvénients

d'équilibrage	l'équilibrage	
Sheu et Al.	- Valeur moyenne de la puissance du signal reçu - Variance de nombre de stations par point d'accès	la charge est considérée identique pour toutes les stations
Papanikos et Logothetis	- nombre de stations - puissance du signal reçu - valeur moyenne du puissance du signal reçu	ne considère pas les besoins spécifiques de chaque station
Hsiao et Al.	- charge véhiculée sur un chemin - nombre de nœuds sur un chemin	S'applique plutôt aux réseaux multi sauts où un routage est nécessaire
Balachandran et Al.	Bandes passantes minimale et maximale des stations	N'est pas complètement transparente. Les stations sont obligées de changer d'emplacement
Bajerano et Al.	- Bande passante sur le lien sans fils - Bande passante sur le lien filaire	Basée sur le mode PCF
Raniwala et Chiueh	- charge des stations et points d'accès	- Changement dynamique des puissances de transmission des APs, opération difficile à maîtriser - Nécessite une supervision du canal
Tsai et Lien	Bandes passante utilisée et maximale d'un point d'accès	Conduit à un nombre important de réassociations
Zhao et Al.	Besoins en bande passante des stations	Applicable si routage dans un réseau maillé
Velayos et Al.	La bande passante utilisée au niveau de chaque AP	- Appliquée que localement dans un réseau (nombre limité d'AP) - Nombre important d'associations et dissociations
Approches industrielles	Bande passante utilisée au niveau de chaque AP	Aucune information sur le niveau d'équilibrage ni les techniques réellement mises en oeuvre

Suite à la synthèse de ces différents travaux, nous remarquons qu'ils utilisent généralement la puissance du signal reçu et le niveau de bande passante des points d'accès pour effectuer l'équilibrage de charge. Quelques uns de ces travaux restent spécifiques à des contextes très particuliers telles que les réseaux ad hoc ou multi sauts. D'autres nécessitent la récupération d'informations sur l'état du canal, opération difficile à mettre en œuvre hors du contexte du standard 802.11. Certains travaux restent plutôt intéressants par la prise en compte de la bande passante demandée par les utilisateurs mais les décisions d'équilibrage restent non optimisées.

Pour toutes les raisons présentées précédemment, dans la suite de ce chapitre nous proposons un nouvel algorithme d'équilibrage de charge dans le contexte des réseaux publics sans fil. En plus du rapport signal sur bruit, notre approche se base sur les demandes en bande passante des différents utilisateurs et la charge de tous les points d'accès du réseau. Pour remédier aux défaillances de l'ensemble des approches détaillées dans l'état de l'art, par exemple pour l'optimisation du nombre de réassociations dans le réseau, nous utilisons une démarche et des paramètres spécifiques.

4. Proposition d'un nouvel algorithme d'équilibrage

A l'instar des différents travaux de recherche que nous avons exposés dans le paragraphe précédent, nous voyons que la prise en compte du rapport signal sur bruit (SNR) ou encore de l'indicateur de la puissance du signal reçu (RSSI) pour décider de l'association d'une station sans fil à un point d'accès ou à un autre, tel que c'est défini dans le standard 802.11, reste insuffisant pour le support de la qualité de service dans les réseaux 802.11. Nous voyons que les approches d'équilibrage de charge entre les points d'accès permettent d'améliorer les performances globales du réseau et qu'elles peuvent améliorer la qualité de service perçue par chacun des utilisateurs présents dans le réseau sans fil. Pourtant, la plupart de ces approches ne prennent pas en compte les besoins en qualité de service de l'ensemble des utilisateurs du réseau sans fil. Dans cette perspective nous proposons une approche d'équilibrage de charge prenant en compte la bande passante demandée par les utilisateurs et la charge actuelle des points d'accès pour décider de l'association des stations mobiles. En plus de la bande passante, le rapport SNR est toujours utilisé pour garantir la qualité promise par le standard 802.11. L'architecture que nous proposons considère le réseau public sans fil dans sa globalité. Par rapport aux travaux présentés dans (Velayos, 2004), notre objectif est d'équilibrer les charges entre tous les points d'accès du réseau. L'équilibrage, quand il est effectué, permet de faire intervenir les points d'accès à zones de couvertures communes mais aussi les points d'accès lointains. A l'issue de l'exécution de l'algorithme d'équilibrage de charge une solution globale sur l'ensemble du réseau sera retrouvée pour être appliquée par l'ensemble des points d'accès. Nous définissons des états de charge pour les points d'accès du réseau. L'état de charge est calculé sur la base de la charge de tous les points d'accès du réseau et non pas sur la base des APs qui se chevauchent comme présenté par Velayos et Al. (2004) ou par les mêmes auteurs dans (Aleo, 2003). Dans d'autres approches, l'index d'équilibrage de charge β est présenté comme un indice d'évaluation de l'équilibrage entre les points d'accès se chevauchant. Par contre, dans notre approche, ce paramètre sera calculé sur toutes les zones de couverture communes du réseau. Il est utilisé pour sélectionner les stations à réassocier. Dans la suite de ce paragraphe, nous présentons l'architecture de notre solution d'équilibrage. Nous détaillons ensuite sur la base d'un exemple l'exécution de notre algorithme d'équilibrage de charge. Le protocole mis en place pour assurer la communication entre les différentes entités du réseau sans fils afin d'assurer l'équilibrage de charge sera détaillé dans le chapitre suivant.

4.1. Architecture générale de la solution d'équilibrage

Pour la mise en place de notre solution d'équilibrage de charge, nous supposons que les applications peuvent exprimer explicitement leurs besoins en termes de qualité de service. Outre la disponibilité du réseau, facteur demandé par toutes les applications voulant y accéder, ces applications doivent fournir leurs besoins en termes de bande passante à utiliser, de taux de pertes toléré et de délai maximal. L'exécution de l'algorithme dans sa version actuelle se base essentiellement sur le rapport signal sur bruit (ou la puissance du signal reçu) et la bande passante demandée. Les paramètres taux de pertes toléré et délai maximal peuvent être intégrés dans de prochaines améliorations de l'algorithme. L'objectif de cet algorithme est de minimiser les différences de charges entre les points d'accès du réseau tout en offrant des liens sans fil avec un maximum de puissance de réception (SNR) pour l'ensemble des stations. Le problème d'équilibrage de charge consiste à assurer un ensemble d'associations entre toutes les stations et les points d'accès du réseau en satisfaisant un certain nombre de contraintes. Plus formellement l'équilibrage de charge peut être défini par la fonction suivante:

$$f = \min \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} \left| CAP_i - CAP_j \right|$$

- n : nombre des points d'accès du réseau

En respectant cette fonction, le rapport SNR est considéré d'une façon implicite puisque dans une réassociation, une station est toujours affectée au point d'accès avec le plus fort SNR. La fonction d'équilibrage que nous avons proposé, par rapport aux autres travaux d'équilibrage de charge présentés précédemment, considère le réseau local sans fils dans sa globalité. L'équilibrage est effectué en regardant tous les points d'accès du réseau et non pas un groupe particulier de ces points d'accès. Vu les travaux précédents, notre fonction permet alors un passage à l'échelle, pouvant ainsi s'appliquer à un réseau sans fils avec un nombre important de BSSs. Au cours de l'exécution de notre algorithme d'équilibrage, nous utilisons la fonction β, utilisée par Balachandran et Al. comme fonction d'équilibrage, juste pour choisir la zone du réseau dans laquelle il faut commencer à faire des réassociations. Nous avons aussi défini des seuils d'équilibrage de charge. Ces seuils calculés par rapport à la charge moyenne de tous les points d'accès du réseau permettent de déduire si la charge d'un point d'accès est équilibrée ou s'il est surchargé. Par rapport aux travaux précédents, la définition de ces seuils assure une meilleure vitesse de convergence vers une topologie à charges équilibrées. Ceci confère un minimum de stabilité en limitant les séquences d'association/ réassociations

erratiques. En effet, l'objectif de notre algorithme d'équilibrage de charges est d'avoir une architecture du réseau sans fils (liens entre stations et points d'accès) qui répond aux besoins de l'ensemble des utilisateurs. L'algorithme pourra donc aboutir à plusieurs solutions acceptables. La définition des seuils dans l'algorithme d'équilibrage permet de délimiter l'ensemble de ces solutions. Des valeurs de seuils étendues permettront à l'algorithme d'équilibrage de converger plus vite, au risque d'avoir une solution admissible avec des différences de charges considérables entre les points d'accès. Par contre des valeurs étroites donneront des charges plus équilibrées entre les points d'accès mais plus d'instabilité avec un nombre plus important d'association/réassociation des stations. L'algorithme d'équilibrage de charges n'est pas automatiquement relancé à chaque changement sur la topologie du réseau sans fils. Si les points d'accès sont capables de répondre aux besoins de l'ensemble des stations sans fils, suite à un changement de la topologie comme par exemple l'entrée d'une nouvelle station dans l'espace du réseau, il ne sera pas nécessaire d'exécuter notre algorithme d'équilibrage.

Dans la solution proposée (Jabri, 2007), un serveur d'équilibrage de charge est connecté au système de distribution et peut donc échanger des informations avec les différents points d'accès. Ce serveur, permet, quand nécessaire, de retrouver suite à l'exécution de l'algorithme d'équilibrage de charge, un nouvel ensemble d'associations entre les stations mobiles et les points d'accès. L'un des atouts de notre solution est qu'elle n'est pas complètement centralisée. En effet le recours au serveur d'équilibrage ne se fait que si une décision au niveau local des points d'accès n'est plus possible. Il y a un mécanisme de contrôle d'accès sur l'AP et un algorithme d'équilibrage sur le serveur. Ceci nous permet d'optimiser les temps d'accès des stations mobiles au médium sans fil. Des informations sur les demandes des applications sont enregistrées localement au niveau de chaque point d'accès. Une base de données est aussi mise à jour au niveau du serveur. Cette base contient l'état des associations et les paramètres de qualité de service de tous les utilisateurs qui sont actuellement connectés au réseau public sans fil. La base de données du serveur est mise à jour à la suite de chaque événement (nouvelle association, réassociation, dissociation) dans le réseau. La figure suivante représente l'architecture générale de la solution d'équilibrage (Jabri, 2006).

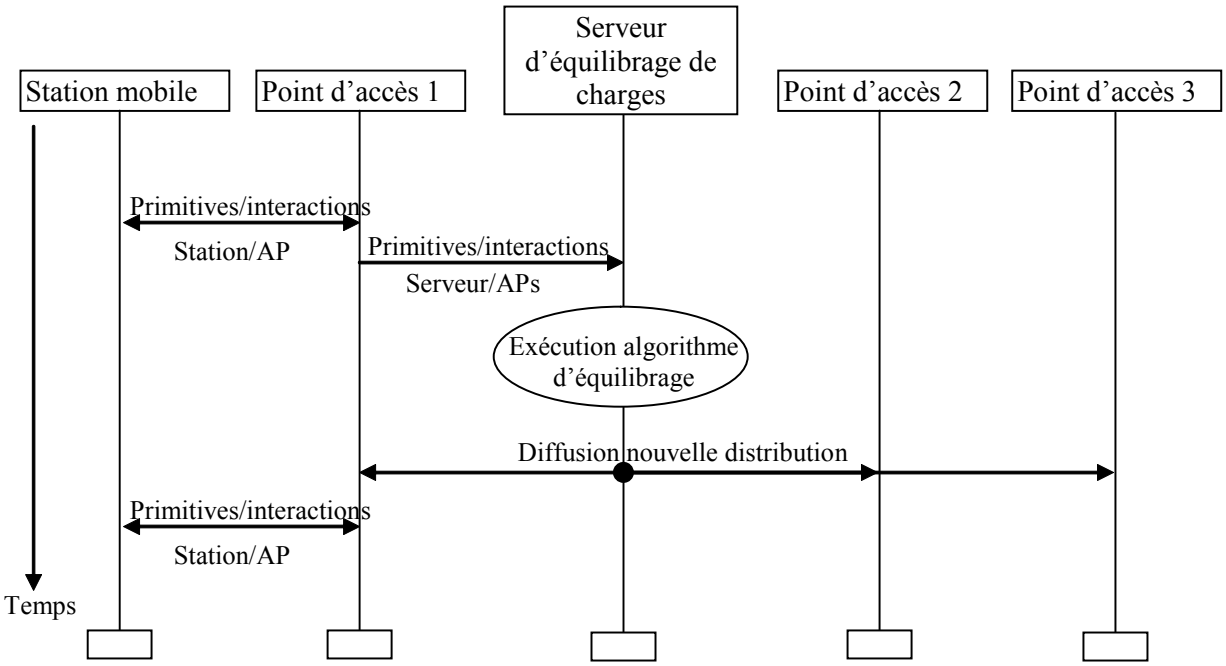

Fig. 2.1 Architecture du système d'équilibrage de charges

Quand une station entre dans l'espace du réseau elle demande, suite à une procédure de balayage du standard 802.11, connexion auprès du point d'accès à plus grand rapport SNR. Si ce dernier est capable de répondre à cette nouvelle demande tout en respectant les demandes des stations déjà connectées, il l'accepte et met à jour la base de données du serveur. S'il n'est pas possible à la station de s'associer à ce point d'accès, sa demande est transmise au serveur d'équilibrage de charge qui doit exécuter l'algorithme afin de retrouver une distribution prenant en charge la nouvelle station tout en équilibrant les charges entre les différents points d'accès.

4.2. Algorithme d'équilibrage de charge

Le serveur d'équilibrage de charge doit exécuter cet algorithme chaque fois qu'une demande lui parvient de l'un des points d'accès. Cette demande de redistribution doit informer le serveur des paramètres de qualité de service de la nouvelle station. En considérant que la station est attachée au point d'accès en question, le serveur doit calculer la charge moyenne (CM) des points d'accès du réseau.

$$CM = \frac{\sum_{i=1}^{n} CAP_i}{n}$$

- CAP_i est la charge d'un point d'accès AP_i
- n est le nombre des points d'accès du réseau.

Pour calculer la charge de chaque point d'accès, on prend en compte l'ensemble des stations qui lui sont associées. Etant au niveau MAC 802.11 avec une seule file d'attente par station (au contraire, pour 802.11e il y a plusieurs files d'attente par station), on considère que la charge d'une station est égale au trafic total pouvant provenir éventuellement de plusieurs sessions, voir plusieurs types d'applications. Quant plusieurs applications s'exécutent simultanément au niveau d'une même station, si le paramètre de qualité de service à considérer est le débit, ceci sera la somme des débits demandés par toutes ces applications. Si on considère d'autres paramètres de qualité de service, le besoin exprimé par la station sera le paramètre correspondant à l'application la plus exigeante (Par exemple, si ce paramètre est le délai, le besoin de la station sera le délai le plus faible parmi l'ensemble des applications).

On définit le paramètre d'équilibrage δ comme un pourcentage de la charge moyenne (20% par exemple). Ce paramètre est défini pour les mêmes objectifs que dans (Velayos, 2004) mais sa définition n'est plus la même (il ne représentait pas un pourcentage de la charge moyenne dans (Velayos, 2004)). La variation du paramètre d'équilibrage permettra de choisir le degré d'équilibrage entre les points d'accès du réseau. Une faible valeur de δ permettra d'avoir un équilibrage strict, mais ceci peut avoir l'inconvénient d'augmenter le temps de convergence de l'algorithme. Des états de charge des points d'accès sont définis. Un point d'accès est surchargé si sa charge est supérieure à (CM + δ). Un point d'accès est sous chargé si sa charge est inférieure à (CM - δ). Dans les autres cas, on considère que la charge du point d'accès est équilibrée. L'algorithme d'équilibrage doit agir sur les points d'accès surchargés. On commence par le point d'accès le plus chargé du réseau, soit AP_k. Une première itération commence. L'algorithme arrête la liste des zones de couverture Z_i communes entre AP_k et d'autres points d'accès. On cherche maintenant la zone sur laquelle on doit agir. On calcule l'index β_i pour chacune des zones Z_i.

$$\beta_i = \frac{\left(\sum_{j=1}^{t} CAP_j\right)^2}{t \times \sum_{j=1}^{t} CAP_j{}^2}$$

Avec t est l'ensemble des points d'accès se chevauchant dans Z_i.

Soit Z_l la zone où β est le plus faible. Dans la zone Z_l, il faut chercher la station associée à AP_k dont la bande passante est la plus proche de (CAP_k – CM). L'algorithme prend la décision de rattacher cette station au point d'accès le moins chargé se chevauchant dans la zone Z_l. Suite à cette décision, les charges des différents points d'accès du réseau doivent être

recalculées pour voir s'il y a encore des points d'accès surchargés. Si c'est le cas, une deuxième itération de l'algorithme commence. A la fin de cette procédure, s'il n'y a plus de points d'accès surchargés, la solution globale comprenant toutes les dissociations et réassociations sera diffusée vers l'ensemble des points d'accès du réseau. Les stations qui sont attachées seront forcées d'appliquer la solution diffusée.

Il est à noter que pour une station placée dans une zone de couverture commune à 2 ou plusieurs points d'accès, si cette station est dissociée de l'un de ces AP pour être associée à un autre avec un rapport SNR plus faible, ceci dégrade la qualité de signal pour cette station, mais on reste toujours au dessus du seuil de puissance *Reception_threshold* définit par le standard IEEE802.11. Avec cette approche d'équilibrage, la qualité du signal promise par le standard est toujours garantie.

Dans la figure suivante, on représente un diagramme qui résume l'exécution de l'algorithme.

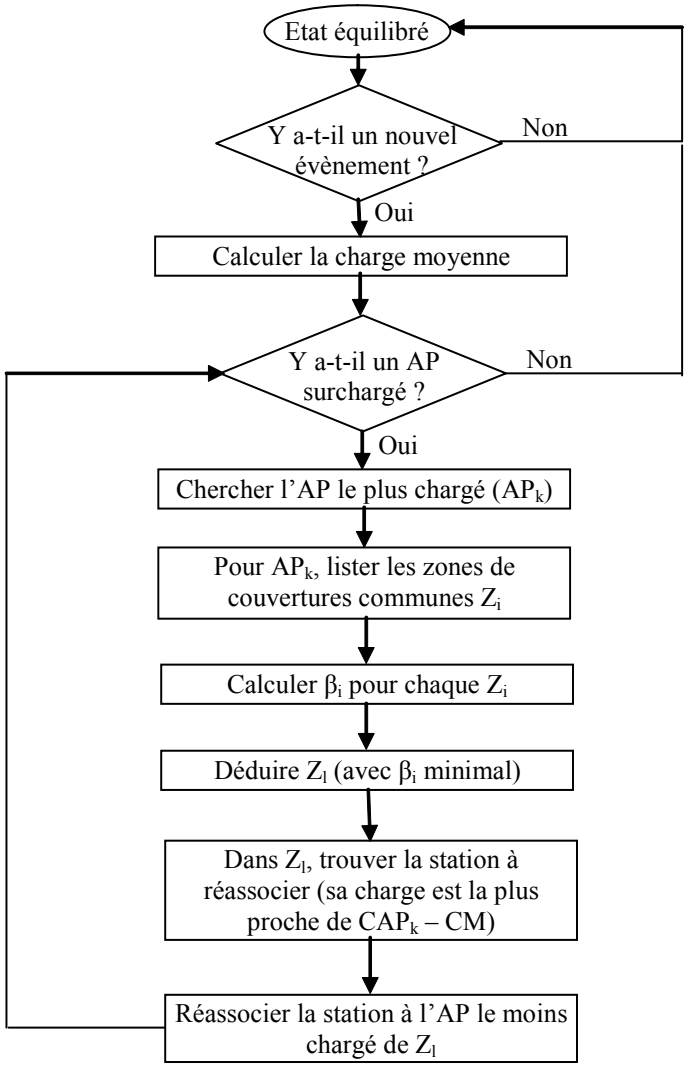

Fig. 2.2 Algorithme d'équilibrage de charges

4.3. Exemple

Dans ce paragraphe, nous montrons par un exemple l'exécution de l'algorithme d'équilibrage de charge sur une configuration donnée de réseau. Dans ce réseau, trois points d'accès AP1, AP2 et AP3 sont connectés à un système de distribution. 13 stations mobiles sont connectées à ces APs. Des applications de types voix, vidéo et données s'exécutent sur ces stations. Ces applications génèrent respectivement des trafics de 38,4 Kbps, 1000 Kbps et 600 Kbps. La topologie du réseau est présentée dans la figure 2.3. Nous appelons Z1 la zone de couverture commune entre AP1 et AP3, Z2 la zone de couverture commune entre AP2 et AP3, Z3 la zone de couverture commune entre AP1 et AP2 et Z4 la zone de couverture commune aux trois points d'accès. Nous supposons qu'une nouvelle station M14 à trafic vidéo vient de se placer dans une zone couverte uniquement par AP2. Après un balayage (actif ou passif) pour la recherche d'un point d'accès, la station M14 se rendra compte de la proximité de AP2 auquel elle va demander authentification puis association.

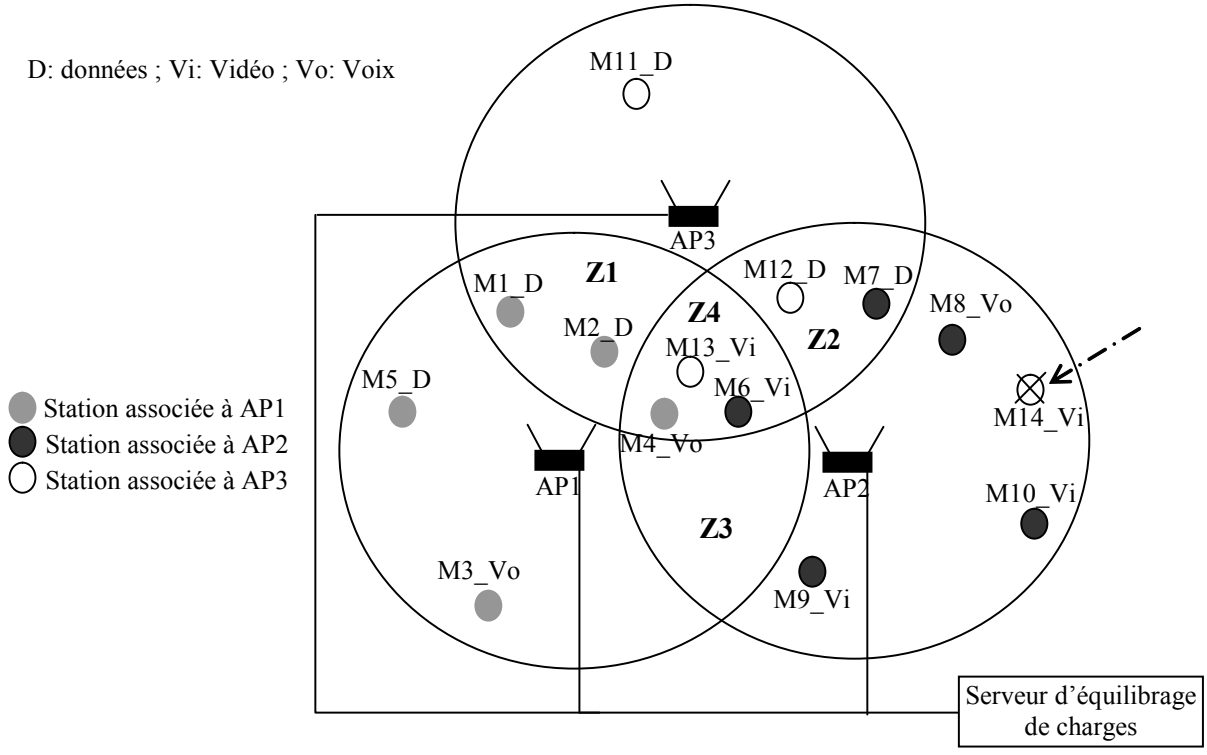

Fig. 2.3 Topologie du réseau public

Voyant qu'il n'est pas capable de satisfaire les besoins en termes de bande passante de la nouvelle station, le point d'accès AP2 doit solliciter le serveur d'équilibrage de charge pour une éventuelle redistribution des utilisateurs entre les différents points d'accès.

Le serveur commence par calculer la charge moyenne des points d'accès (il considère que la station M14 est associée à AP2).

CM = 2905 Kbps. Avec CAP1=1876,8 Kbps ; CAP2=4638,4 Kbps et CAP3=2200 Kbps.

Si on suppose que le paramètre d'équilibrage est δ= 20%. La limite maximale de charge sera égale à CM+20%CM = 3486 Kbps. Un aperçu de la charge des différents points d'accès par rapport à la charge maximale est présenté dans la figure 2.4.

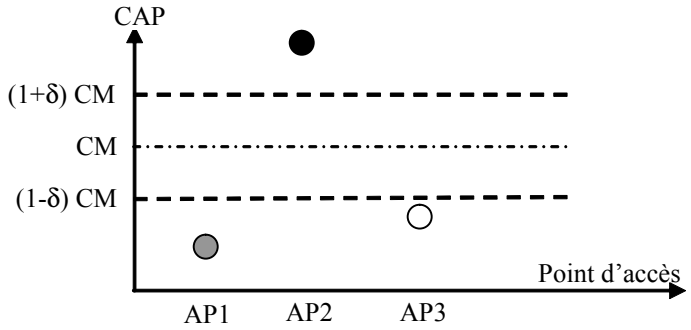

Fig. 2.4 Niveau de charge initial des points d'accès

Le seul point d'accès surchargé est donc AP2. La liste de zones de couvertures communes sur lesquelles on doit agir sont donc Z_2, Z_3 et Z_4. Comme il n'y a aucune station dans la zone Z_3, on s'intéressera aux zones Z_2 et Z_4. Pour Z_2 et Z_4 on calcule l'indice d'équilibrage de charges. Ceci nous donne : β_2= 0,89 et β_4=0,85.

Nous agissons donc dans la zone Z_4 (AP1, AP2 et AP3) pour détacher une station de AP2 et la rattacher au point d'accès le moins chargé, c'est-à-dire AP1. La charge de cette station est la plus proche de C=CAP2 – CM = 1733,4. En d'autres termes, s'il y a plusieurs stations de la zone Z_4 qui sont actuellement associées à AP2, la station à réassocier est de préférence avec un trafic vidéo, en deuxième lieu avec trafic données et sinon avec un trafic voix. Dans notre cas, une seule station de Z_4 est associée à AP2, donc elle sera la station à réassocier : station M6_Vi.

A la suite de cette itération, l'algorithme décide donc de réassocier M6_Vi à AP1. On doit revoir l'état de charge des différents points d'accès.

On a : CAP1=2876,8 Kbps ; CAP2=3638,4 Kbps et CAP3= 2200 Kbps. Le niveau de charge des AP est présenté dans la figure 2.5.

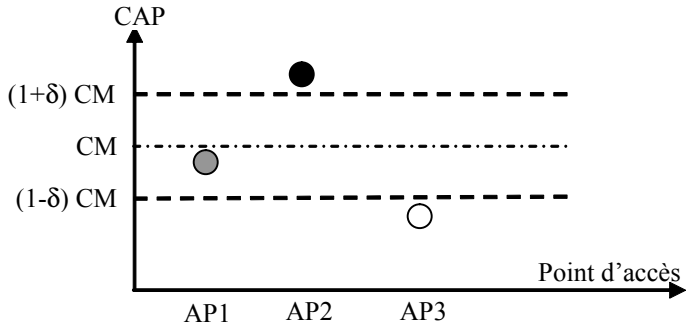

Fig. 2.5 Charge des APs suite à la 1ère itération

L'algorithme ne doit pas s'arrêter là ; en effet AP2 est toujours surchargé (CAP2 > CAP2+δ).

On continue alors à agir sur Z_2 et Z_4. Cette fois ci (après l'affectation de M6_Vi à AP1), on aura : β_2= 0,94 et β_4=0,96. Nous agissons alors dans la zone Z_2. La charge de la station à réassocier est la plus proche de C=CAP2 – CM = 733,4. Elle est prioritairement une station générant un trafic de données. Sur la zone Z_2, une seule station (M7_D) est associée à AP2, c'est la station qu'on doit associer au point d'accès le moins chargé se chevauchant avec AP2 sur Z_2, ici AP3. Suite à l'association de M7_D à AP3, nous calculons les charges des différents points d'accès.

CAP1= 2876,8 Kbps ; AP2= 3038,4 Kbps et AP3= 2800 Kbps. La figure suivante représente l'état de charge des points d'accès.

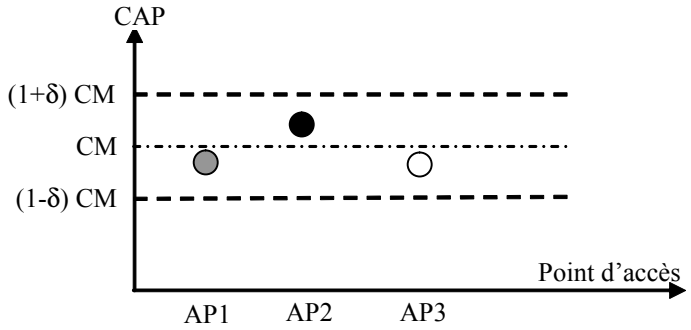

Fig. 2.6 Charge des APs suite à la 2ème itération

Ainsi nous remarquons qu'il n'y a plus aucun point d'accès surchargé. L'algorithme d'équilibrage de charge s'arrête après deux itérations. La solution globale est illustrée dans le tableau suivant :

Tableau 2.2 Solution globale aprés équilibrage de charges

Station Mobile	Ancien point d'accès (avant l'exécution de l'algorithme)	Nouveau point d'accès (après l'exécution de l'algorithme)
M7_D	AP2	AP3
M6_Vi	AP2	AP1
M14_Vi	----	AP2

Cette solution sera diffusée aux différents points d'accès pour forcer les stations mobiles à changer leurs points d'association permettant ainsi d'accepter l'entrée de la nouvelle station dans le réseau. La nouvelle topologie du réseau est présentée dans la figure 2.4.

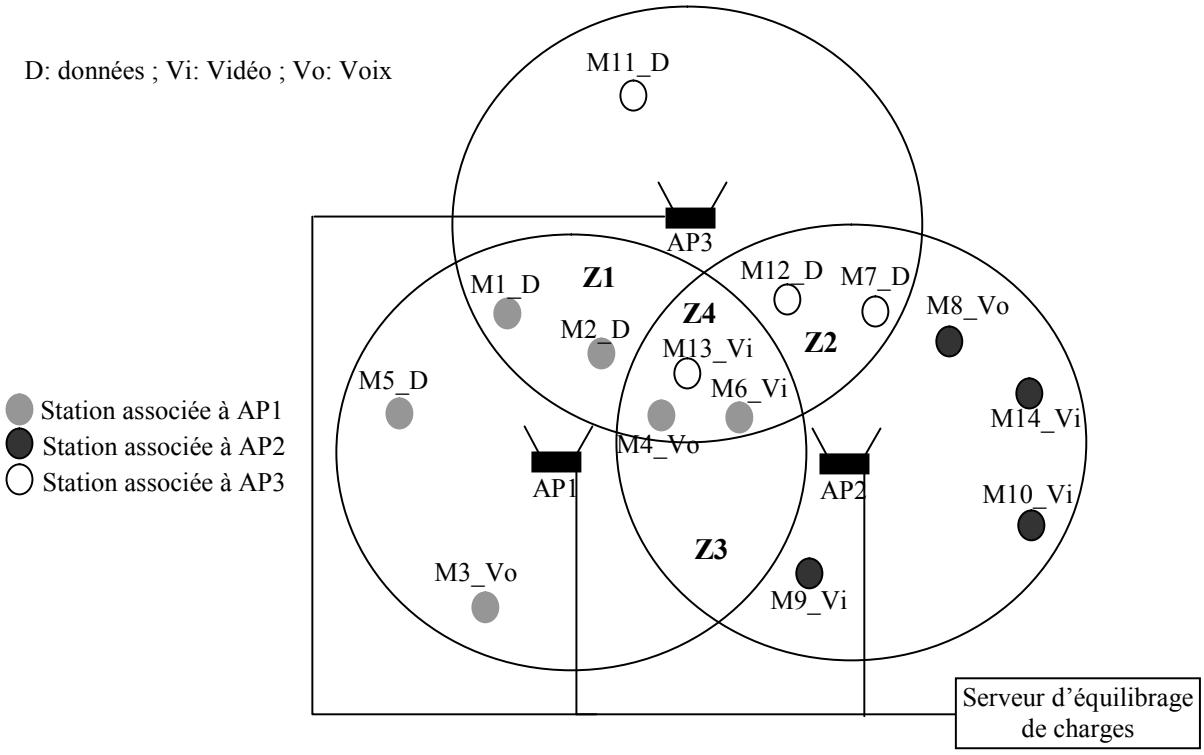

Fig. 2.7 Topologie du réseau public après équilibrage de charges

4.4. Amélioration de l'algorithme

Pour fournir une qualité de service encore meilleure, nous avons proposé une amélioration de l'algorithme déjà présenté. Afin d'éviter la réassociation des stations avec les applications voix et vidéo, nous ajoutons une consigne au niveau de protocole interdisant le transfert de ces stations. Cela permettra d'éviter les handovers et à ces applications de se dérouler sans coupures, ce qui permet d'éviter des pics de délais et de gigues. La solution globale recherchée par l'algorithme ne doit donc transférer que des stations avec des applications "données". Dans la suite nous présentons un deuxième exemple de topologie de réseaux publics. Par rapport à la topologie présentée dans la figure 2.3, nous avons modifié la répartition initiale des stations sur les 3 points d'accès. La topologie que nous allons étudier est présentée dans la figure 2.8.

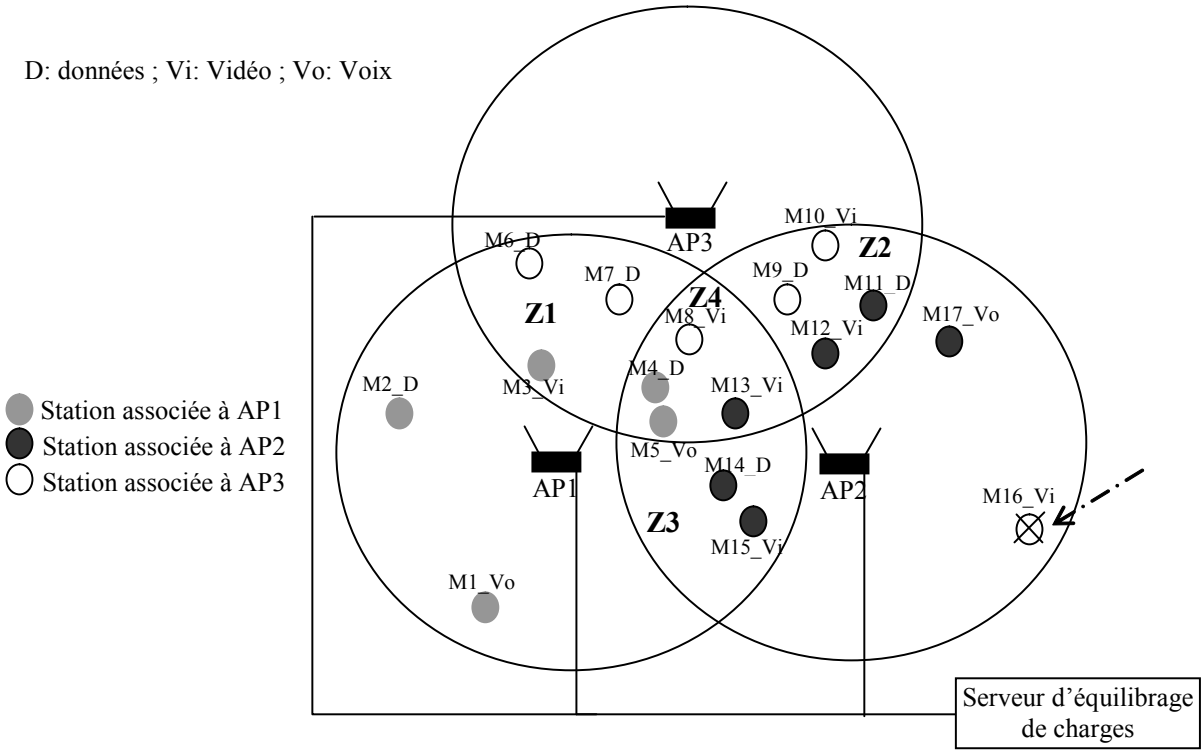

Fig. 2.8 Topologie initiale du réseau public

Une station M16_Vi vient d'arriver dans la zone de couverture de AP2 en demandant connexion au réseau. Le tableau suivant illustre les associations actuelles entre stations et points d'accès ainsi que les stations situées dans des zones de chevauchement.

Tableau 2.3 Positions des stations sans fil du réseau

		Z1	Z2	Z3	Z4	Aucun chevauchement
AP1	M1_Vo					*
	M2_D					*
	M3_Vi	*				
	M4_D				*	
	M5_Vo				*	
AP2	M11_D		*			
	M12_Vi		*			
	M13_Vi				*	
	M14_D			*		
	M15_Vi			*		
	M16_Vi					*
	M17_Vo					*
AP3	M6_D	*				
	M7_D	*				
	M8_Vi				*	
	M9_D		*			
	M10_Vi		*			

Le calcul des charges de chacun des points d'accès donne :

CAP1= 2276,8 kbps, CAP2= 5238,4 kbps et CAP3= 3800 kbps. La charge moyenne est donc CM= 3771,74. La charge maximale est donc égale à (1+ δ)CM= 4526,1 kbps (δ=20%).
La charge initiale des points d'accès est présentée par la figure 2.9.

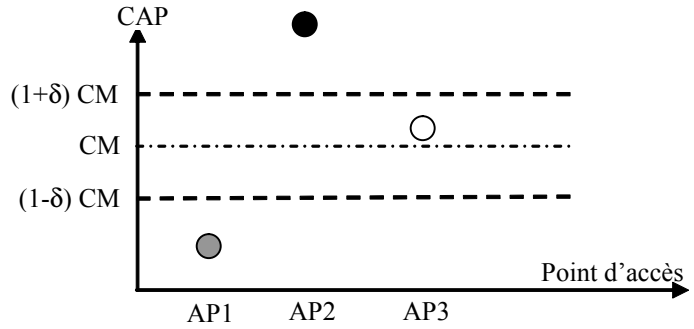

Fig. 2.9 Charge initiale des APs

Le point d'accès AP2 est surchargé. Il faut calculer les valeurs de β pour les zones Z2, Z3 et Z4. On a : β_2=0,97 ; β_3=0,86 et β_4=0,90. D'après ces valeurs, il faut déplacer une station associée à AP2 de la zone Z3. On a CAP2- CM= 1466,6 kbps, il serait donc plus intéressant (en termes de convergence de l'algorithme) de déplacer une station vidéo (M15_Vi). L'algorithme amélioré interdit le transfert de telles stations, nous voyons s'il y a encore d'autre type de stations pouvant être transférées. On réassocie alors M14_D de AP2 vers AP1. Suite à cette itération, nous recalculons les charges des APs : CAP1=2876,8kbps ; CAP2=4638,4kbps et CAP3=3800kbps. AP2 est toujours surchargé. On calcule les valeurs de β pour les zones Z2, Z3 et Z4. On a : β_2=0,99 ; β_3=0,94 et β_4=0,96. D'après ces valeurs, il faut aussi déplacer une station associée à AP2 de la zone Z3. Cependant, il n'y a plus de stations transférables dans cette zone. Mise à part Z3, la zone avec le plus faible β sera Z4. Mais il se trouve qu'il n'y a pas de stations transférables dans Z4 de AP2 vers un autre AP. Il ne reste plus qu'à transférer une station de la zone Z2 de AP2 et donc vers AP3. Dans Z2, la station M11_D peut être transférée. De AP2 vers AP3. Les charges des points d'accès seront donc : CAP1=2876,8kbps ; CAP2=4038,4kbps et CAP3=4400kbps. La charge des APs est présentée sur la figure 2.10.

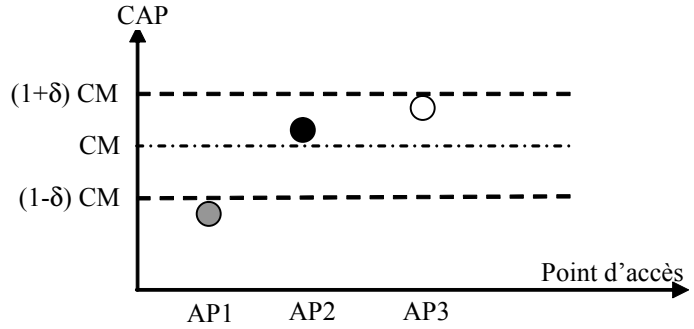

Fig. 2.10 Charge des APs après la 2ème itération

Nous constatons qu'il n'y a plus de points d'accès surchargés au bout de cette troisième itération.

Effet du paramètre δ

Le paramètre δ permet aussi de changer l'exécution de l'algorithme d'équilibrage de charges. En effet, sur l'exemple précédent, si la valeur de δ est de 10% ceci donnera un seuil maximal de charge des APs : (1+ δ)CM=4148,91kbps. Jusqu'à la fin de la deuxième itération, l'exécution de l'algorithme sera identique. Mais à ce niveau la charge des APs pourra être représenté comme dans la figure 2.11.

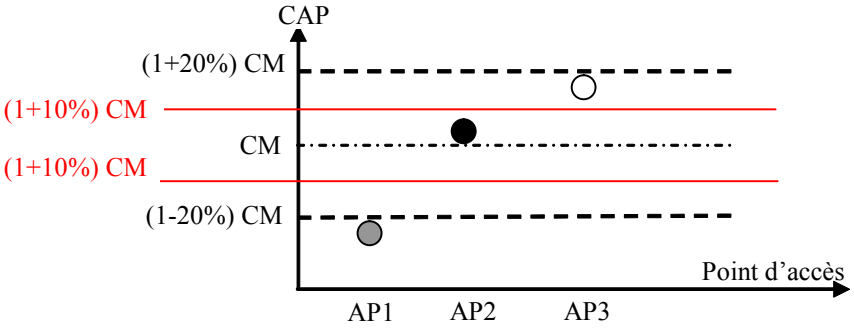

Fig. 2.11 Charge des APs suite à la 2ème itération (avec δ = 10%)

Avec δ= 10% nous voyons donc qu'il y a toujours un AP surchargé suite à la 2ème itération (CAP3=4400kbps). L'algorithme ne s'arrête plus à cette itération. Il faut décharger AP3. Nous devons tout d'abord calculer les valeurs de β pour Z1, Z2 et Z4. On obtient : β_1=0,95 ; β_2=0,99 et β_4=0,97. Nous cherchons donc une station avec une application « données » de la zone Z1, à transférer de AP3 vers AP1. Ici on peut transférer soit M6_D ou M7_D (ici, nous pouvons rajouter un critère de sélection de station à transférer : il faut transférer les stations avec un minimum de variation du rapport SNR entre le nouveau et l'ancien points d'accès). Nous choisissons de transférer M6_D. Les charges des APs, données par la figure 2.12, sera donc : CAP1=3476,8kbps ; CAP2=4038,4kbps et CAP3=3800kbps.

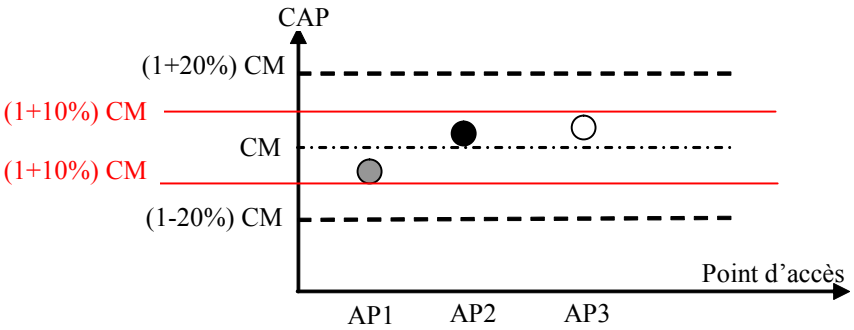

Fig. 2.12 Charge des APs suite à la 3ème itération (avec δ = 10%)

Nous voyons qu'il n'y a plus de points d'accès surchargés et que l'algorithme peut s'arrêter au bout de cette troisième itération.

En général, une valeur plus faible de δ donnera des charges beaucoup plus équilibrées entre les points d'accès mais peut entraîner une augmentation de la durée d'exécution de l'algorithme.

Le paramètre δ aura donc des conséquences sur l'exécution de l'algorithme d'équilibrage (vitesse de convergence, stabilité, etc) mais aussi sur la qualité de la solution d'équilibrage obtenue. Le choix d'une valeur pour ce paramètre dépend de la dimension du réseau sans fils c'est-à-dire le nombre de points d'accès, le nombre de stations, les valeurs possibles des débits demandés par chacune des stations, etc. Si la valeur de δ est très grande, la convergence de l'algorithme est plus rapide mais les charges des points d'accès ne sont pas aussi équilibrées (cette solution risque de ne pas être avantageuse). Si la valeur de δ est trop petite, l'algorithme d'équilibrage risque de ne pas converger vers une solution. Pour éviter ces risques, nous pouvons choisir une valeur minimale de δ permettant une tolérance égale au débit le plus élevé parmi l'ensemble des stations du réseau par rapport à la valeur moyenne des charges (δ_{min} * CM = le débit le plus élevé parmi toutes les stations). L'objectif reste d'aboutir à une solution qui répond aux besoins en termes de qualité de service de l'ensemble des stations du réseau. Le choix d'une valeur de δ dépendra du contexte dans lequel le système d'équilibrage est installé et pourra être déterminé et affiné après quelques expérimentations.

4.5. Remarques

Dans ce paragraphe nous avançons quelques remarques quand à l'exécution de l'algorithme.

- un point d'accès ne sollicite une redistribution des stations que s'il n'est pas capable de satisfaire une nouvelle demande. Nous pouvons fixer un seuil de charge maximal pour un point d'accès IEEE 802.11b. S'il reste au dessous de ce seuil, un point d'accès peut accepter la demande d'association d'une nouvelle station. Ceci permettra d'éviter la procédure d'équilibrage et d'accélérer ainsi la connexion de la station au réseau. Quand il accepte une station, un AP doit informer le serveur de cette nouvelle association afin de mettre à jour la base de données pour une éventuelle redistribution.
- La base de données du serveur contient la liste des points d'accès et l'ensemble des stations connectées à chacun d'eux. Cette base contient aussi pour chaque station l'ensemble des points d'accès auxquels elle est rattachable. Suite à la procédure de scan effectuée par chaque station à l'entrée dans le réseau, elle connaît l'ensemble de ces points d'accès. Elle les fournira au point d'accès auquel elle s'associera par la suite (dans la requête d'association). Ils sont classés selon les puissances décroissantes du signal reçu au niveau de la station.

- Nous supposons que les utilisateurs sont fixes. Pour étendre l'algorithme d'équilibrage de charge au cas où les stations sont mobiles, nous obligerons les stations mobiles à reformuler une nouvelle demande de réservation de bande passante à chaque fois qu'elles se déplacent vers d'autres points d'accès dans l'espace de couverture du réseau.
- Les demandes des stations mobiles peuvent se faire sous la forme d'une marge de bande passante (seuil min et max). Au démarrage du réseau et tant que possible, les stations seront admises par le réseau avec la bande maximale demandée. Si à un moment donné, une redistribution s'avère nécessaire, une première décision à rajouter dans l'algorithme, sera de réduire la charge des stations connectées à la valeur minimale demandée, avant de passer aux étapes que nous avons déjà présentées. Une politique de sélection des stations pour lesquelles la charge sera réduite au minimum sera aussi rajoutée à l'algorithme.

5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les motivations nous poussant à adapter une politique d'équilibrage de charge pour le support de la qualité de service des réseaux sans fils. Nous avons par la suite étudié un ensemble de travaux de recherche et des solutions constructeurs pour l'insertion de cette politique. Ensuite nous avons présenté le système d'équilibrage de charge adopté et l'algorithme qui s'exécute dans une entité principale de cette solution : le serveur d'équilibrage de charge. Dans le chapitre suivant, nous présentons le protocole que nous avons élaboré pour mettre en œuvre la distribution calculée par l'algorithme.

Références

Aguayo, D., J. Bicket, S. Biswas, G. Judd et R. Morris (2004). Link-level Measurements from an 802.11b Mesh Network. In Proceedings of ACM SIGCOMM, Portland, OR, August 2004.

Aleo, V. (2003). Load distribution in IEEE 802.11 cells. Master thesis, KTH, Royal Institut of Technology, Mars 2003.

Balachandran, A., G.M. Voelker, P. Bahl et P.V. Rangan (2002a). Characterizing user behavior and network performance in a public wireless LAN. ACM SIGMETRICS international conference on measurement and modelling of computer systems (Marina Del Rey, California).

Balachandran, A., G.M. Voelker et P. Bahl (2002b). Hot spot congestion relief in public-area wireless networks. 4th workshop on mobile computing systems and applications (Callicoon, NY, USA) pp 70-80.

Balazinska, M. et P. Castro (2003). Characterizing mobility and network usage in a corporate wireless local-area network. Proceedings de MobiSys (international conference on mobile systems, applications, and services), pp. 303-316, San Francisco, CA, USA.

Bejerano, Y., S.J. Han, et L. Li (2004a). Fairness and load balancing in wireless LAN's using association control. ACM Mobicom, 2004.

Bejerano, Y. et R.S. Bhatia (2004b). MiFi : a framework for fairness and QoS assurance in current IEEE 802.11 networks with multiple access points. IEEE Infocom, 2004.

Blinn, D., T., Henderson et D. Kotz (2005). Analysis of a Wi-Fi Hotspot Network. The International Workshop on Wireless Traffic Measurements and Modelling (Seattle, WA, USA), pp1-6.

Brickley, O., S. Rea et D. Pesch (2005). Load balancing for QoS enhancement in IEEE802.11e WLANs using cell breathing techniques. 7ème IFIP International Conference on Mobile and Wireless Communications Networks, Maroc, 2005.

Cisco systems (2007). http://www.cisco.com/en/US/netsol/ns340/ns394/ns348/ns337/networking_solutions_white_paper0900aecd802c18ee.shtml

Chinchilla, F., M. Lindsey et M. Papadopouli (2004). Analysis of Wireless Information Locality and Association Patterns in a Campus. In Proceedings of IEEE INFOCOM, Hong Kong, March 2004.

Decotignie, J.-D (2001). A Perspective on Ethernet-TCP/IP as a Fieldbus. 4th International Conference on Fieldbus Systems and their Application, IFAC, pp. 138-143.

Henderson, T., D., Kotz et I. Abyzov (2004). The changing usage of a mature campus-wide wireless network. Proceeding de ACM MobiCom, Philadelphia, PA, USA, pp. 187-201.

Hsiao, P., A. Hwang, H.T. Kung et D. Vlah (2001). Load balancing routing for wireless access networks. Proceedings de IEEE Infocom 2001, pp. 986-995.

IETF (2007). CAPWAP, www.ietf.org/html.charters/capwap-charter.html .

Jabri, I., A. Soudani, N. Krommenacker, T. DIVOUX et S. Nasri (2007). Gestion de la qualité de service et équilibrage de charges dans les réseaux sans fils IEEE 802.11. Conférence Internationale « Sciences of Electronics, Technologies of Information and Telecommunication » SETIT, Hammamet, 25-29 Mars 2007

Jabri, I., A. Soudani, N. Krommenacker, T. DIVOUX (2006). A Proposal Approach for Load Distribution and Resources Sharing in IEEE 802.11 Networks. International Conference on Wireless and Mobile Communications, ICWMC'06, July 29-31, 2006, Bucharest, Romania, Roumanie (2006).

Jardosh, A.P., K.N., Ramachandran, K.C., Almeroth et E.M. Belding-Royer (2005). Understanding link-layer behavior in highly congested IEEE 802.11b wireless networks. ACM SIGCOMM, Philadelphia, PA, USA, pp. 11-16.

Kotz, D. et K. Essien (2002). Characterizing usage of a campus-wide wireless network. 8th annual ACM international conference on mobile computing and networking (Westin Peachtree Plaza, Atlanta, Georgia, USA), pp 107-118.

Krommenacker, N. (2002). Heuristiques de conception de topologies réseaux: application aux réseaux locaux industriels. Thèse de doctorat à l'Université Henri Poincaré de Nancy 1.

Meng, X., S. Wong, Y. Yuan et S. Lu (2004). Characterizing Flows in Large Wireless Data Networks. In Proceedings of ACM MOBICOM, Philadelphia, PA, September 2004.

Ojala, T., T., Hakanen, T., Makinen et V. Rivinoja (2005). Usage analysis of a large public wireless LAN. WirelessCom 2005.

Papanikos, I. et M. Logothetis (2001). A study on dynamic load balance for IEEE802.11b wireless LAN. Proceedings of 8th international conference on advances in communication and control, COMCON8, Rethymna, Crete/Greece, June, 2001.

Proxim wireless networks (2007). Orinoco access point family. http://www.proxim.com/learn/library/datasheets/AP-2000_A4.pdf

Raniwala, A. et T. Chiueh (2004). Evaluation of a wireless entreprise backbone network architecture. Proceedings de Symposium of high performance interconnects, pp. 98-104.

Rondeau, E. (2001). Conception d'architectures de réseaux locaux par analyse du trafic. Habilitation à Diriger des Recherches, Université Henri Poincaré - Nancy 1, 30 novembre 2001

Shiann-Tsong Sheu et Chih-Chiang Wu (1999). Dynamic Load Balance Algorithm (DLBA) for IEEE 802.11 wireless LAN. Tamkang Journal of Science and Engineering, vol. 2, No. 1, pp. 45-52.

Tang, D. et M. baker (2000). Analysis of a local area wireless network. 6th annual ACM international conference on mobile computing and networking (Boston, Massachusetts), pp 1-10.

Tang, D. et M. baker (2002). Analysis of a metropolitain area wireless network. Wireless Networks (Kluwer Academic Publishers), Vol. 8 (2-3), pp 107-120.

Tsai, T.C. et C.F. Lien (2003). IEEE 802.11 hot spot load balance and QoS maintained seamless roaming. National Computer Symposium (NCS).

Thomas, G. (2000). Introduction to Switch Technology - Improving the Performance of Ethernet Networks. Control Network, vol. 1, N°. 9.

Velayos, H., V. Aleo et G. Karlsson (2004). Load balancing in overlapping wireless LAN cells. IEEE internationl conference on communication, Vol. 7, pp. 3833-3836, June 2004.

Yeo, J., M. Youssef et A. Agrawala (2004). A framework for wireless LAN monitoring and its applications. Proceedings de ACM workshop on wireless security, Philadelphia, PA, USA, pp. 70-79.

Zhao, D., J. Zou et T.D. Todd. Admission control with load balancing in IEEE 802.11-based ESS mesh networks. Wireless Networks, Vol. 13, pp. 351-359.

Chapitre 3

Protocole d'équilibrage de charge

1. Introduction

La mise en place du système d'équilibrage de charge présenté dans le chapitre précédent, nécessite l'insertion de nouveaux échanges entre les différentes entités du réseau. Les stations doivent pouvoir exprimer leurs demandes en termes de qualité de service. Elles recevront des réponses pour s'associer à un point d'accès ou à un autre. Les points d'accès du réseau doivent pouvoir communiquer avec le serveur d'équilibrage de charges. Cette communication permettra soit de mettre à jour le serveur, soit de demander une redistribution des charges entre les points d'accès. La solution globale retrouvée par le serveur sera à chaque fois diffusée sur le système de distribution.

Dans ce chapitre, nous commençons par aborder la spécification des échanges entre les différentes entités du système d'équilibrage de charges. Nous expliquons le déroulement de ces échanges sur la base de quelques scénarios. Nous présentons ensuite la validation formelle et des simulations du protocole.

2. Spécification du protocole

Dans ce paragraphe nous présentons les échanges nécessaires pour assurer le fonctionnement de notre système d'équilibrage de charges proposé. Nous rappelons que les entités présentes dans le réseau public sans fils sont les stations mobiles, les points d'accès et le serveur d'équilibrage de charges. Les points d'accès et le serveur sont supposés connectés par un système de distribution.

2.1. Joindre un point d'accès dans le standard 802.11

Dans le standard IEEE 802.11, lorsqu'une station mobile souhaite rejoindre le réseau sans fils, elle effectue une opération de balayage pour identifier les réseaux existants. Deux types de balayage sont possibles : un balayage actif et un balayage passif.

Dans un balayage passif, la station se place sur chaque canal de sa liste de canaux *ChannelList* et attend de recevoir des trames balises. Ces dernières sont régulièrement envoyées par les points d'accès pour annoncer les paramètres d'accès aux stations mobiles se trouvant dans leurs zones de couverture. Parmi les paramètres contenus dans le corps de cette trame, on peut citer les paramètres de synchronisation, les vitesses de transmission permises, les paramètres de puissance permettant aux stations de régler leurs puissances d'émission, les paramètres du mode PCF, etc. Les trames balises sont stockées par la station dans un tampon afin d'en extraire des informations sur le BSS des points d'accès qui les ont envoyés. Le balayage passif permet une économie d'énergie des stations puisqu'il n'implique pas la transmission de trames à partir de la station.

Dans le balayage actif, sur chaque canal, la station envoie des trames requêtes d'enquête (*Probe request*). Avant d'émettre, la station doit attendre que le canal soit libre pour un temps *ProbeDelay*. Elle utilise ensuite la méthode d'accès DCF pour envoyer sa trame. Si aucune activité n'est remarquée sur le canal pendant un temps *MinChannelTime*, aucun point d'accès n'existe sur ce canal. Si pendant ce temps le médium a été occupé, la station attendra une durée *MaxChannelTime* pour traiter les trames Réponses d'enquête reçues (*Probe response*). Ces trames sont générées par les réseaux sans fils chaque fois qu'ils entendent une requête d'enquête. A la fin de l'opération de balayage, un rapport de balayage est généré. Il donne la liste de tous les BSS découverts ainsi que leurs paramètres. Après une analyse des résultats du balayage, la station peut décider de rejoindre l'un des BSS. Le choix du BSS est une décision spécifique à l'implémentation. Le choix d'un BSS implique la correspondance des paramètres

locaux à ceux imposés par le BSS choisi. Le critère utilisé pour cette décision est la puissance du signal.

Suite au choix du point d'accès, la station doit ensuite s'authentifier. Telle qu'elle est définie dans le standard cette procédure d'authentification n'apporte pas un mécanisme de sécurité. C'est une authentification de bas niveau. Dans un système ouvert, la procédure d'authentification initiée par la station mobile comprend l'échange de deux trames. La station envoie son identité (adresse MAC) dans une requête d'authentification. Le point d'accès poursuit le processus en renvoyant une réponse. La réponse est une trame d'authentification qui contient trois éléments d'information : l'identifiant de l'algorithme d'authentification (fixé à 0 dans le cas de système ouvert d'authentification), le numéro de séquence égal à 2 (il est égal à 1 dans la requête envoyée par la station) et un code d'état indiquant le résultat de la requête d'authentification (code égal à 0 si l'opération se termine avec succès). Une authentification par clé partagée est aussi possible. Une distribution d'une clé WEP partagée à toutes les stations est nécessaire avant de commencer l'authentification. La première trame est envoyée par la station et est identique à celle envoyée dans le système ouvert d'authentification (l'identifiant d'authentification est fixé à 1). Le point d'accès répond par une trame réponse qui contient, en plus de l'identifiant de l'algorithme d'authentification, le numéro de séquence et le code d'état, un texte de défi. La troisième trame constitue la réponse de la station mobile au défi pour prouver qu'elle est autorisée à rejoindre le réseau. Après avoir reçu la troisième trame, le point d'accès tente de la déchiffrer et vérifie le contrôle d'intégrité WEP. Si la trame déchiffrée correspond au texte de défi et si le contrôle d'intégrité est correct, le point d'accès répond par un code d'état positif. Le standard 802.11 prévoit aussi un mécanisme de pré authentification permettant à une station de s'authentifier à un deuxième point d'accès quand elle est déjà associée à un autre. La pré authentification permet d'accélérer le transfert d'association des stations mobiles. Une fois l'authentification terminée, les stations peuvent s'associer avec le point d'accès afin d'obtenir un accès complet au réseau. L'association est une procédure de conservation d'enregistrements qui permet au système de distribution de suivre l'emplacement de chaque station mobile avant que les trames destinées à une station soient envoyées au bon point d'accès. Une fois l'association terminée, le point d'accès enregistre la station mobile en envoyant une trame ARP afin que l'adresse MAC de la station soit associée au port de connexion du point d'accès. La procédure d'association est aussi initiée par la station mobile qui envoie une requête d'association. Le point d'accès traite cette requête d'association et décide si l'association doit être accordée. Si la demande est accordée, le point d'accès répond par un code d'état égal à 0 et un identifient

d'association (AID : Association ID). L'AID est une valeur numérique identifiant d'une manière logique la station mobile à laquelle des trames mises en tampon doivent être envoyées. Les réponses négatives d'association incluent uniquement un code d'état et la procédure se termine. La procédure de réassociation consiste à déplacer une association depuis un ancien point d'accès vers un nouveau. Lorsqu'une station passe de la zone de couverture d'un point d'accès à celle d'un autre, elle utilise ce processus de réassociation pour informer le réseau 802.11 de son nouvel emplacement. La station démarre la procédure de réassociation quand elle détecte un autre point d'accès (autre que celui avec lequel elle est associée) offrant une meilleure qualité de signal. La station envoie une requête de réassociation au nouveau point d'accès (auquel elle doit être authentifiée). Cette requête contient un champ dans lequel est inscrite l'adresse de l'ancien point d'accès. Si le nouveau point d'accès accepte l'association de cette station il lui envoie une réponse positive avec un nouveau AID. Il utilise un protocole inter points d'accès IAPP pour terminer la procédure de réassociation. Il demande à l'ancien point d'accès si des trames destinées à la nouvelle station lui ont été enregistrées. Les trames en tampon sur l'ancien point d'accès sont transférées au nouveau afin qu'elles puissent être livrées à la station. Suite à cette opération, le nouveau point d'accès commence à traiter les trames destinées à la station mobile.

2.2. Protocole d'équilibrage de charges

Pour valider notre approche, nous avons défini de nouvelles primitives permettant entre autres de mettre en œuvre les décisions issues de l'exécution de l'algorithme d'équilibrage (Jabri, 2006). Les échanges prévus pour la mise en place de l'équilibrage de charge s'insèrent juste après la procédure de balayage définie dans le standard. Ayant un rapport de balayage contenant la liste des points d'accès à proximité et leurs paramètres respectifs, la station devra commencer par demander l'authentification auprès du point d'accès avec la meilleure qualité de signal. Ensuite, la station devra communiquer au point d'accès ses besoins en termes de qualité de service en fonction des applications qu'elle supporte. Chaque station est supposée capable de formuler explicitement ses besoins en termes de communication. Dans l'approche protocolaire proposée, la demande de connexion est exprimée par une requête *Req_Connect*. Elle contient en plus de l'identité de la station et du point d'accès sollicité, la bande passante minimale nécessaire de l'application, le taux de perte toléré par l'application, une information sur la mobilité de la station (station fixe ou en mobilité). Dans cette requête la station doit aussi indiquer si oui ou non elle se trouve dans les zones de couverture d'autres points d'accès. Si c'est le cas, elle doit les lister ainsi que leurs paramètres respectifs. Ces

informations seront récupérées du rapport de balayage. Elles seront utiles pour l'exécution de l'algorithme d'équilibrage de charges. Ces informations seront comprises dans le corps de la trame. Cette requête contient aussi une entête MAC et un champs FCS. L'en-tête MAC est la même pour toutes les trames de gestion. La structure générale d'une trame de gestion est présentée dans la figure suivante.

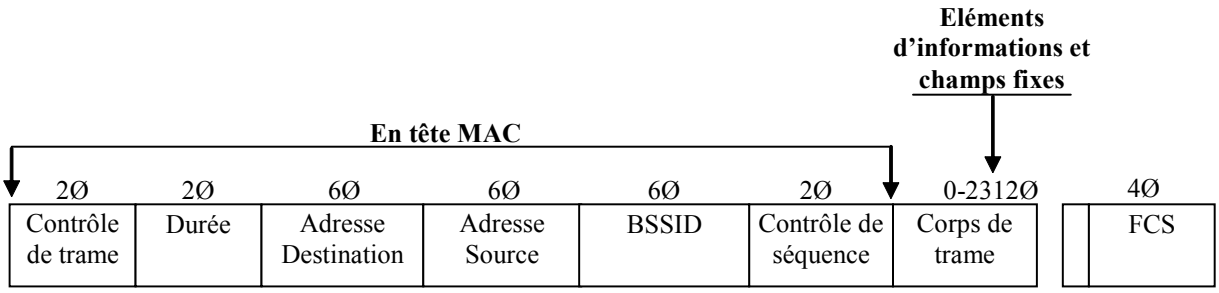

Fig. 3.1 Structure générale d'une trame de gestion

Le champ contrôle de trame de l'en-tête contient des informations sur la trame en cours, entre autres la version du protocole, le type (2 bits) et le sous type (4 bits) de la trame. Les valeurs des champs *type* et *sous type* permettent de définir plusieurs catégories de trames. La valeur 00 affectée au champ *type* désigne une trame de gestion. Pour ce type de trames, nous remarquons qu'un ensemble de valeurs du champ *sous type* ne sont pas utilisées par le standard et sont donc libres. Nous considérons que la trame *Req_Connect* est une trame de gestion (type=00). Nous lui affectons un sous type non utilisé pour les trames de gestion (Gast, 2002), soit sous type = 0110. L'identité de la station et du point d'accès figurent sur l'en-tête de la trame (adresse source et adresse destination). Nous intégrons les paramètres de qualité de service demandés par la station dans un élément d'information. Un deuxième élément contiendra une information sur la mobilité de la station (fixe ou mobile) et un troisième élément contiendra une information si oui ou non d'autres APs sont à proximité et une liste éventuelle de ses points d'accès.

Rappelons que les éléments d'information sont des composants à longueurs variables. Un élément d'information générique inclut un numéro d'identifiant, une longueur et un composant de longueur variable. Des valeurs normalisées pour le numéro d'identifiant sont définis dans le standard, d'autres sont réservées pour des applications futures (11-15, 17-31, 43-49) ou inutilisées (51-255). La structure d'un élément d'information est donnée par la figure 3.2.

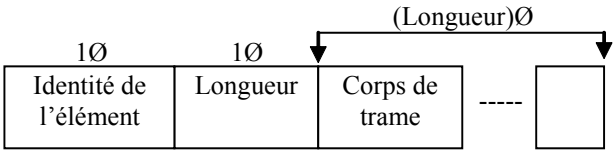

Fig. 3.2 Structure d'un élément d'information

Pour la trame *Req_Connect*, nous affectons les valeurs 70, 71 et 72 respectivement pour le 1er, 2ème, et 3ème élément d'information. Les nomenclatures de ces éléments seront respectivement : Paramètres QoS, Mobilité et Liste AP. Dans la figure suivante nous présentons la structure de la trame *Req_Connect*.

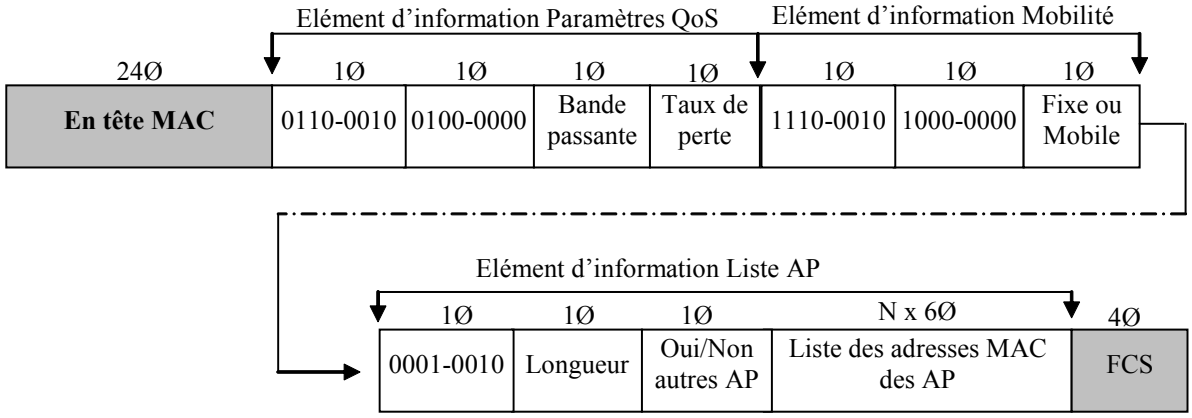

Fig. 3.3 Structure de la requête Req_Connect

Des correspondances entre valeurs binaires et valeurs réelles sont proposées pour les champs *Bande passante* et *Taux de perte*. Le champ *Fixe ou Mobile* prendra la valeur 0 si la station est fixe, 1 si elle est mobile. La valeur du champ longueur de l'élément d'information Liste AP dépend du nombre de points d'accès à proximité de la station. La valeur de ce champ est 1 quand il n'y a pas d'autres AP à proximité de la station à part celui pour lequel la trame est envoyée. Le champ *Oui/Non autres AP* est égal à 0 s'il n'y a pas de points d'accès au voisinage. Sinon ce champ contient le nombre des autres points d'accès à proximité (selon le rapport de balayage). Le champ *liste des adresses MAC des AP* contient successivement les adresses MAC des autres points d'accès à proximité de la station. Ils sont classés selon la puissance du signal reçu.

A cette demande de connexion, le point d'accès contacté par la station doit répondre par une trame *Ack_Connect*. Cette réponse peut être positive ou négative. Trois cas peuvent se présenter :

- le point d'accès est capable d'associer la station mobile avec les paramètres de QoS demandés. Dans ce cas la réponse est positive.
- le point d'accès est incapable d'associer la station mobile sans nuire à la qualité fournie aux stations déjà associées. Dans ce cas, le point d'accès demandera au serveur d'équilibrage de

charges une redistribution des stations entre les différents points d'accès. Suite à une redistribution réussie, le serveur diffuse la solution aux différents points d'accès. Une réponse positive sera aussi envoyée par le point d'accès avec l'identité de l'AP auprès duquel il faudra demander association.

- si la réponse du serveur est négative, c'est-à-dire qu'il n'est pas possible de retrouver une distribution des stations mobiles entre les différents points d'accès tout en prenant en charge la nouvelle station. Dans ce cas le point d'accès doit renvoyer une réponse négative à la station mobile. Nous pouvons supposer que ce cas de figure ne peut arriver que si la charge totale des points d'accès est dépassée. Dans les autres cas, nous supposons que l'espace de couverture commune entre les points d'accès est suffisamment large pour permettre une grande flexibilité de l'algorithme d'équilibrage.

La trame *Ack_Connect* contient donc un code d'état indiquant si oui ou non une proposition d'association a été accordée. Le champ *Code d'état* est un champ fixe (appellation du standard 802.11 pour les champs de longueur fixe = 2 octets) des trames de gestion. La valeur de ce champ est égale à 0 si l'opération se termine avec succès. Elle est égale à 1 dans le cas d'un échec indéterminé. Nous choisissons d'utiliser ces valeurs pour la trame *Ack_Connect*. Si la réponse est négative, cette trame contient un seul champ fixe (sans aucun élément d'information) qui est le code d'état égal à 1. Une marge importante de valeurs possible du champ *code d'état* est laissée pour des utilisations futures. Quelques unes de ces valeurs peuvent être utilisées pour des codes d'erreurs avec des spécifications plus détaillées. La réponse *Ack_Connect* positive contient un champ *code d'état* égal à 0. Elle contient en plus un champ élément d'information *Paramètres QoS* contenant les valeurs de qualité de service accordée à la station mobile. Ces paramètres sont égaux à ceux demandés par la station. Ils peuvent être différents si une procédure de négociation est intégrée dans le système d'équilibrage de charges. Un élément d'information *Liste AP* contient l'adresse du point d'accès auprès duquel la station doit lancer une procédure d'association. Le champ longueur de cet élément sera égal à 7. Le champ *Oui ou Non autres AP* sera égal à 0 si la station doit demander l'association auprès du même point d'accès auquel la trame *Req_Connect* a été envoyée. Il sera égal à 1, si la station doit s'associer à un autre point d'accès. Le champ *Liste des adresses MAC des AP* contient une seule adresse MAC correspondant au point d'accès auquel la station doit s'associer. La structure d'une trame *Ack_connect* positive est donnée par la figure 3.4.

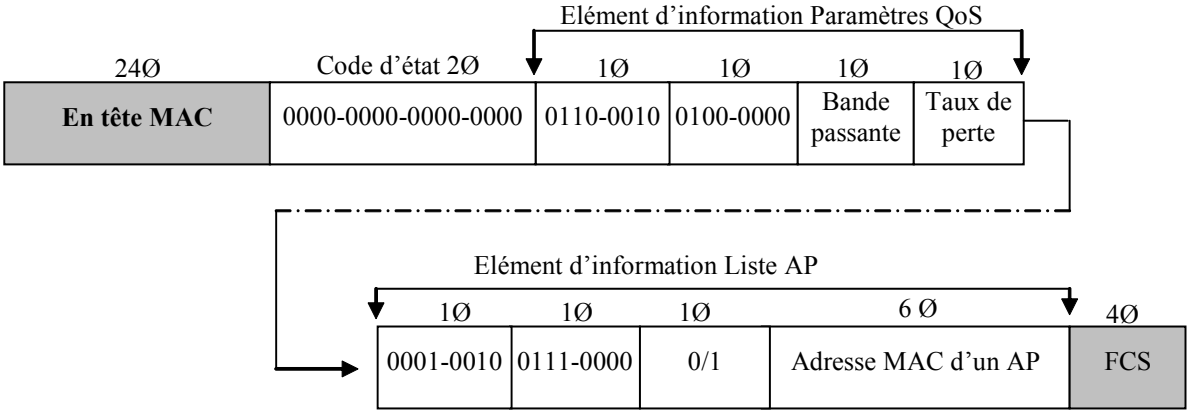

Fig. 3.4 Structure de la trame Ack_Connect positive

Bien entendu pour cette trame nous proposons la valeur du champ type égale à 00 (trame de gestion). Nous lui affectons la valeur 0111 comme valeur de sous type (cette valeur est aussi libre sur le standard 802.11). La structure de la trame *Ack_Connect* négative est représentée dans la figure 3.5.

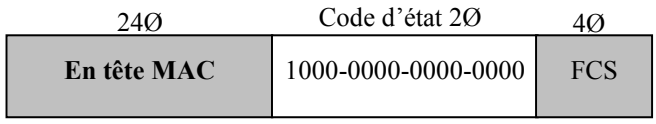

Fig. 3.5 Structure de la trame Ack_Connect (réponse négative)

Les valeurs des champs type et sous type de l'en tête MAC de la trame *Ack_Connect* négative sont les mêmes que la réponse positive.

Maintenant, il nous reste à présenter les échanges entre les points d'accès et le serveur d'équilibrage de charge. Ces trames seront alors acheminées sur le lien filaire (généralement Ethernet à 100 Mbps).

- la trame *Update_Server* : cette trame est envoyée d'un point d'accès vers le serveur d'équilibrage de charges. Suite à l'association d'une station à un point d'accès du réseau, il est nécessaire de mettre à jour la base de données du serveur d'équilibrage. Ceci permettra de prendre la bonne décision dans la prochaine exécution de l'algorithme. En plus de l'identité du point d'accès et de la station venant de s'associer, cette trame doit contenir les paramètres de qualité de service avec lesquels la station a été admise sur le réseau sans fils. C'est-à-dire la bande passante et le taux de pertes toléré par l'application.
- La trame *Req_Dist* : cette trame est envoyée d'un point d'accès vers le serveur d'équilibrage de charges. Le point d'accès envoie cette trame suite à une demande de connexion de la part d'une station mobile, pour laquelle il ne peut pas répondre positivement. N'étant pas capable de garantir les paramètres de qualité de service

nécessaires à l'application, il faut demander une redistribution des stations mobiles auprès du serveur d'équilibrage. Pour effectuer cette opération, le point d'accès doit transmettre au serveur les paramètres de QoS demandés, l'information sur la mobilité et les éventuels points d'accès à proximité de cette station. Ces informations sont récupérées de la trame *Req_Connect* envoyée par la station au point d'accès.

- La trame Ack_Dist : cette trame est envoyée en diffusion du serveur d'équilibrage vers l'ensemble des points d'accès du réseau. Elle contient la solution globale de redistribution des stations mobiles suite à l'exécution de l'algorithme d'équilibrage de charges. La trame ne concerne pas uniquement la nouvelle station sollicitant la connexion au réseau mais aussi toutes les stations mobiles à réassocier afin d'admettre la nouvelle station dans le réseau. La taille de cette trame dépend du nombre de stations pour lesquelles un changement de point d'accès est nécessaire. La trame contient un premier champ *longueur* de taille 1 octet. La valeur 0 de ce champ peut indiquer une réponse négative : le serveur ne trouve aucune distribution des stations permettant d'accepter la nouvelle station dans le réseau. Dans le cas d'une réponse négative, le point d'accès enverra une trame *Ack_Connect* négative à cette nouvelle station. Dans les autres cas, le champ *longueur* contiendra la taille du champ *Redistributions*. Cette taille est égale au nombre de stations à réassocier, en plus de la nouvelle station multiplié par 18 Octets. En effet, pour chaque station à réassocier, on prévoit 3 champs successifs totalisant 18 octets dans le champ *Redistributions*. La structure du corps de la trame *Ack_Connect*, dans le cas d'une réponse positive, est donnée par la figure suivante.

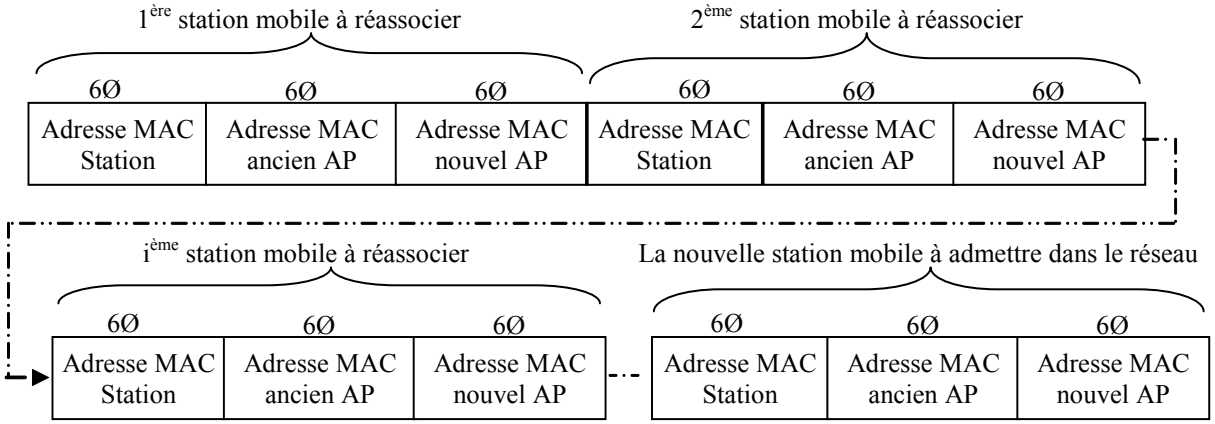

Fig. 3.6 Structure du champ *Redistributions* de la trame ACk_Connect

Nous pensons que des temporisateurs doivent être définis au niveau des différentes entités du réseau. Ces temporisateurs permettront au niveau d'une station mobile de limiter le temps

d'attente d'une réponse suite à la demande de connexion auprès d'un point d'accès. A l'écoulement de se temps, la station devra redemander connexion auprès du point d'accès. Au niveau d'un point d'accès, un temporisateur permettra de définir un temps maximal pour l'attente d'une réponse à une requête de distribution envoyée au serveur d'équilibrage. Au bout de ce seuil, le point d'accès doit renvoyer une réponse de connexion négative à la station mobile demandant la connexion. Ceci peut être dû au fait que le serveur d'équilibrage est en train de chercher une solution pour une autre requête envoyée par un autre point d'accès (nous supposons qu'une seule demande de distribution est prise en compte par le serveur à la fois). Nous avons pensé à utiliser des requêtes d'attente *Wait* pour acquitter la réception d'une demande (soit par un point d'accès soit par le serveur), mais ceci peut entraîner un trafic supplémentaire surtout au niveau du lien sans fils (nous supposons qu'il n'y a pas de problème de bande passante disponible au niveau du lien filaire). Il est donc imprtant d'optimiser les valeurs des temporisateurs au niveau des stations et au niveau des APs. Ces valeurs seuils prendront en considération le temps de consultation de la base de données au niveau d'un point d'accès et de calcul d'une solution d'équilibrage de charges au niveau du serveur. Cette dernière peut être liée à la topologie du réseau public sans fils considéré. Pour encore optimiser les valeurs des temporisateurs proposés, et dans un souci de répondre le plus rapidement possible aux demandes de connexions des stations, les valeurs de ces derniers peuvent être dynamiques en fonction des vitesses de transmissions du lien sans fils. Ces vitesses sont déjà récupérables au niveau du rapport de balayage effectué par chaque station.

3. Exemples de scénarios

Dans ce paragraphe, nous présentons un ensemble de scénarios qui illustrent des cas de figures pouvant avoir lieu dans un réseau sans fil public. Supposons qu'une station mobile STA vient d'entrer dans l'espace couvert par un réseau public sans fil. Suite à l'opération de balayage, la station envoie une requête *Req_Connect* vers le point d'accès APx possédant la meilleure qualité du signal.

- 1er cas : le point d'accès APx consulte sa base de données (l'ensemble des stations qui lui sont associées et leurs paramètres respectifs de qualité de service). Il analyse si les paramètres de QoS demandés peuvent être satisfaites. Dans ce 1er cas le point d'accès est capable de fournir les besoins de la station STA. Il renvoie alors une trame *Ack_Connect* positive à cette station. La station termine la procédure d'association avec APx. A la fin de cette procédure, le point d'accès APx envoie, sur le lien filaire,

une trame *Update_Server* vers le serveur d'équilibrage de charges. Les échanges relatifs à ce cas de figure sont illustrés dans la figure suivante.

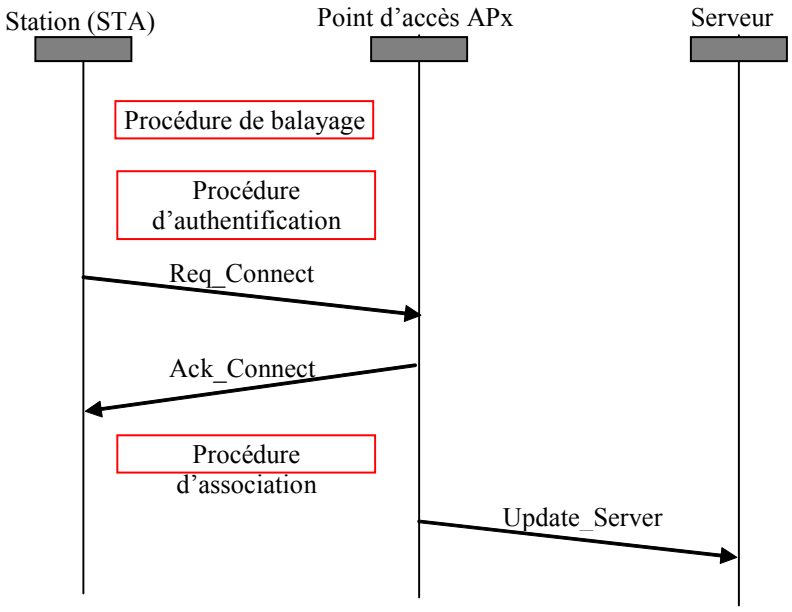

Fig. 3.7 Ackittement positif sans recours au serveur

- 2ème cas : le point d'accès, suite à la consultation de sa base de données, détermine qu'il n'est pas capable d'accepter la connexion de la nouvelle station sans changer les paramètres de qualité de service des stations déjà associées. Dans ce cas, le point d'accès envoie une requête de redistribution des stations mobiles entre les différents points d'accès au serveur d'équilibrage. Dans cette requête, le point d'accès transmet entre autres les paramètres de qualité de service demandés par la station (en effet, il transmet toutes les données contenues dans la trame *Req_Connect* envoyée par la station). Le serveur, ayant exécuté l'algorithme d'équilibrage de charge doit retourner une réponse aux points d'accès. Dans le cas d'une réponse positive, les échanges entre les différentes entités du réseau peuvent être présentés comme dans la figure 3.8.

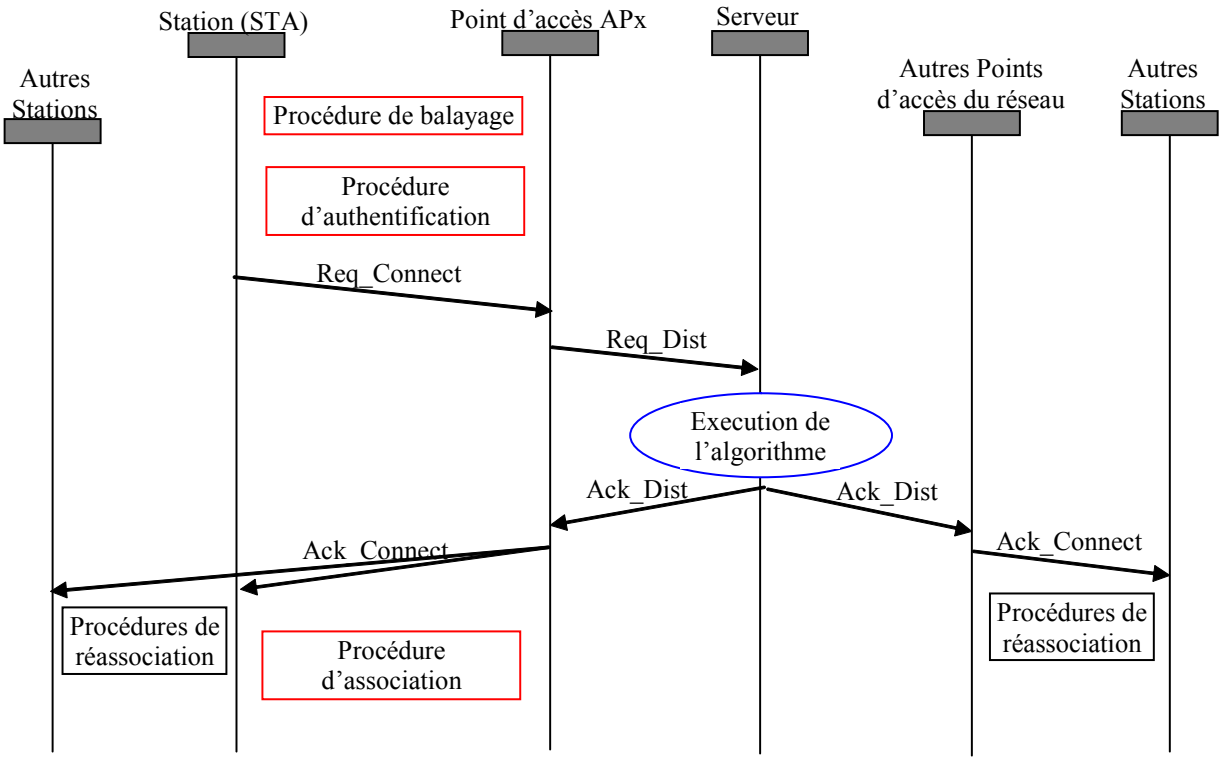

Fig. 3.8 Acquittement positif avec recours au serveur d'équilibrage de charge

La solution globale est diffusée vers tous les points d'accès du réseau. Les points d'accès concernés, doivent diffuser la solution sur le lien sans fils. A la réception des invocations, les stations concernées par la solution doivent effectuer des opérations de réassociation de leurs anciens points d'accès vers les nouveaux. Suite à ces opérations, la station STA peut lancer la procédure d'association, soit avec APx (comme présenté dans la figure 3.8), ou avec un autre point d'accès défini par la solution d'équilibrage. Si le serveur ne trouve pas une solution pour admettre la station STA avec les paramètres de QoS demandés, il envoie une requête *Ack_Connect* négative. Dans ce cas, la station ne doit pas procéder à l'association conformément aux recommandations du standard IEEE 802.11. Nous proposons que la station puisse lancer un temporisateur (juste après la réception de la réponse négative) au bout duquel elle peut redemander connexion auprès d'un point d'accès (toujours avec la force du signal la plus élevée).

4. Validation et simulations du comportement dynamique du système

Les systèmes de communication sont de plus en plus difficiles à développer. Les contraintes faisant faces à ces systèmes tels que l'interopérabilité, la sécurité, la qualité de service, etc. imposent des spécifications et des standards pour le développement de ces spécifications de hautes qualités. La validation de ces systèmes par la simulation des modèles adéquats à leurs spécifications est nécessaire (Doldi, 2003) pour :

- La création des standards par les organisations de normalisation afin de vérifier que le comportement du système est correct, pour générer les diagrammes de séquence MSC : Message Sequence Chart (ITU, 1996) illustrant des cas d'utilisation typiques.
- Avant l'implémentation d'un standard par une compagnie. En effet, les standards ne contiennent pas, ou alors rarement, un modèle fini et prêt à être translaté en code.
- Fournir une spécification avec un faible nombre d'erreurs permettant une implémentation plus rapide et moins chère.
- Suite à des changements sur les spécifications pour tester que le système n'a pas régressé.

Pour les systèmes à hauts risques, la validation par simulation prouve formellement que leurs comportements spécifiques sont corrects suivant un ensemble de critères (Doldi, 2003).

Dans la suite, nous allons sur la base de quelques exemples, effectuer une vérification de l'absence de blocages au niveau de la spécification des échanges mis en place pour l'équilibrage de charges. Pour effectuer cette tâche, nous avons modélisé les interactions entre les différentes entités du système d'équilibrage avant d'effectuer des simulations pour valider leur séquencement. Plusieurs outils peuvent être utilisés pour la modélisation des échanges entre des entités communicantes. Trois techniques de description formelle sont déjà adoptées par les instances de normalisation internationales ITU-T et ISO. L'ISO a normalisé les outils LOTOS : Language of Temporal Ordering Specification (ISO, 1989a) et ESTELLE : Extended State Transition Language (ISO, 1989b) pour les protocoles de communication. L'ITU-T a normalisé l'outil SDL : Specification and Description Language (ITU, 1993). Pour la modélisation du « protocole d'équilibrage » nous avons opté pour l'outil SDL (ObjectGeode de Csverilog). Contrairement à beaucoup de langages formels pour lesquels les outils font défaut, SDL est supporté par des outils de qualité qui deviennent de plus en plus performants, comme ObjectGeode de Telelogic (Mammeri, 2000). Parmi les arguments qui

nous ont poussé à choisir SDL, on notera en plus de sa large utilisation auprès de la communauté scientifique (Mitschelle-Thiel, 2001) (Jiang, 2006), sa capacité à générer automatiquement du code (C/C++), à prendre en compte des systèmes d'exploitation et à générer des séquences de tests permettant une validation de système plus aisée. SDL est un langage permettant de spécifier ou de décrire sans ambiguïtés la structure et le comportement des systèmes englobant des activités parallèles et communicantes (Doldi, 2003). Les spécifications et les descriptions faites à l'aide de SDL doivent être formelles dans le sens qu'il sera toujours possible de les analyser et les interpréter sans ambiguïté. La spécification des composantes d'un système est la description de son comportement souhaité alors que la description d'un système décrit par contre son comportement réel. La spécification d'un système est la définition de ses composantes et des différentes interactions qui régissent son fonctionnement souhaité. Le comportement dynamique (temporel) du système est décrit par la partie de spécification qui concerne la réactivité des composantes envers les échanges. L'aspect spécification de propriétés des systèmes peut être complété par l'utilisation d'autres techniques conjointes à SDL, telles que MSC et les logiques temporelles ou temps réel. Il sert à l'analyse du comportement dynamique et à la vérification des échanges. Les domaines d'applications cibles de SDL sont les systèmes de télécommunications (Jiang, 2006) (Kuorilehto, 2008), les fonctions de gestion des réseaux de communication, les systèmes réactifs, systèmes temps réel, systèmes critiques d'aéronautique et de l'automobile (Fliege, 2005), les protocoles et services de communication et les systèmes distribués (Sherratt, 2003). La première version de SDL a vu le jour en 1976, suivie ensuite par une nouvelle version tous les 4 ans. Nous avons utilisé la version SDL-2000 pour les simulations que nous avons effectuées sur le protocole d'équilibrage de charges. SDL intègre plusieurs mécanismes permettant la structuration des systèmes. Avec SDL, le système peut être décomposé en plusieurs blocs. Ces blocs peuvent être à leur tour décomposés en plusieurs blocs ou en processus. La décomposition permet d'introduire les niveaux de détails nécessaires à la spécification selon les besoins. En plus, les systèmes peuvent être observés à des niveaux de détails différents. Cette abstraction ne signifie pas une spécification vague, incomplète ou imprécise mais plutôt une spécification qui peut être étudiée et analysée sans avoir besoin de détails sur certains constituants de la spécification (Mammeri, 2000). Les différents blocs d'un système sont reliés par des signaux (ou des canaux). La figure suivante donne un aperçu sur l'environnement de développement de l'outil SDL. Les différentes étapes de description et de validation formelle avec SDL et MSC sont montrées.

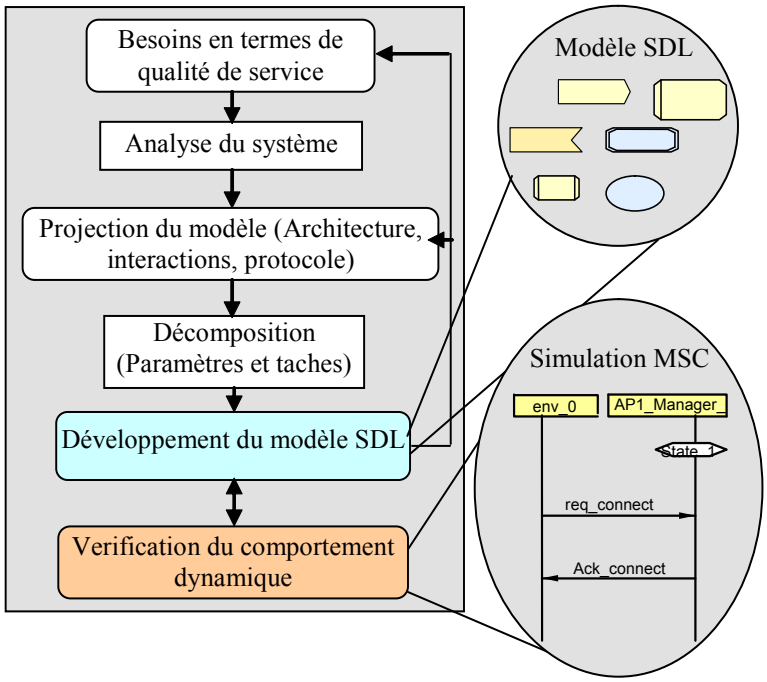

Fig. 3.9 Processus de modélisation et simulation SDL et MSC

4.1. Modèle SDL du système d'équilibrage

Pour le développement du modèle SDL, nous avons décomposé le système qui est le réseau public sans fils en plusieurs entités dont chacune est représentée par un bloc. Le système global est décrit par la figure 3.12. Il est globalement constitué de trois entités : *Mobile*, *Points d'accès* et *Serveur d'équilibrage* qui constituent le réseau public sans fils. Le comportement dynamique de chacun de ces blocs se présente sous la forme d'une machine à états finis étendue (EFSM : Extended Finite State Machines) (Probert, 2001). Les signaux reliant ces différents blocs sont les requêtes que nous avons précédemment décrites pour la mise en place du protocole d'équilibrage. Dans le modèle élaboré, l'instanciation de l'entité *Mobile,* représente la génération d'une station mobile pouvant formuler une requête *Req_Connect* à un des trois points d'accès. Lors de l'étude dynamique, plusieurs stations mobiles peuvent être instanciées et peuvent formuler simultanément ou successivement des demandes de connexion au même AP ou à des APs différents.

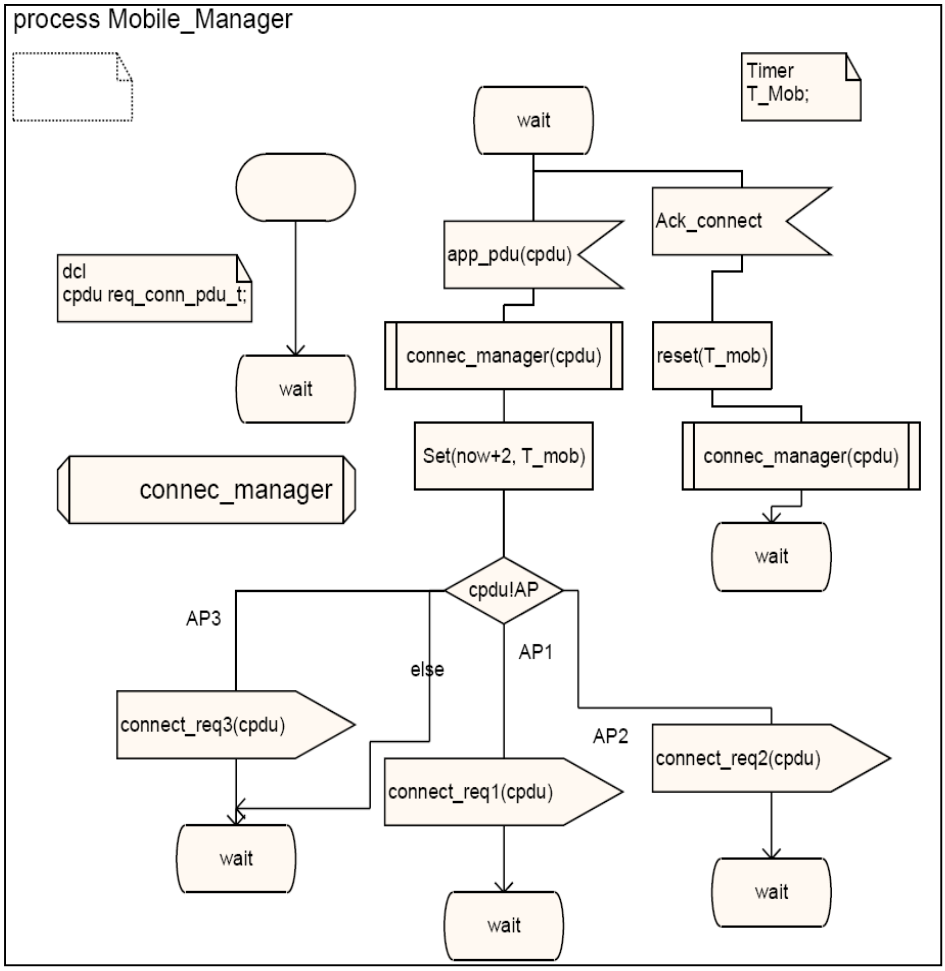

Fig. 3.10 modèle SDL d'un processus de gestion de mobile

Une station mobile est gérée par son processus de gestion *Mobile_Manager* (Figure 3.10). la connexion qui relie l'entité mobile à l'environnement extérieur représentée dans la figure 3.12 par *App_PDU* décrit les demandes formulées par l'application à l'entité mobile. La requête *App_PDU* permet à l'application de formuler ses contraintes de QoS au mobile qui les transmettra à son tour à l'AP avec la requête *Connect_Req*.

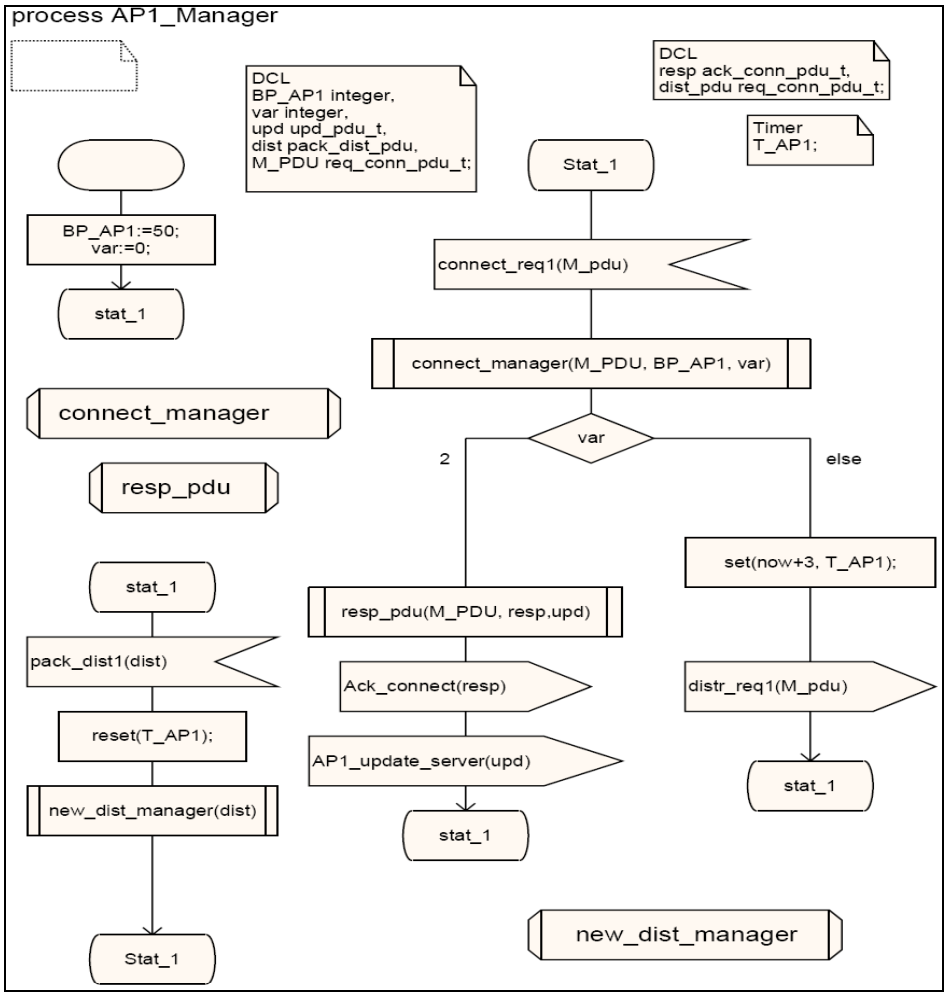

Fig. 3.11 Modèle SDL d'un point d'accès

La figure suivante représente le modèle du réseau public sans fils. Dans ce réseau, nous avons placé trois points d'accès en plus du serveur d'équilibrage de charges et une station voulant s'associer à un point d'accès.

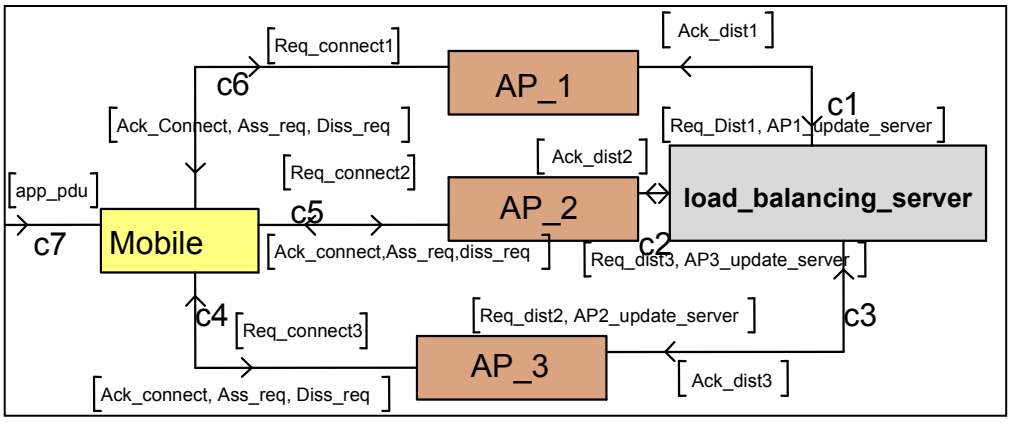

Fig. 3.12 Le modèle SDL du réseau public sans fils

Suite à l'envoi de la requête de connexion au point d'accès offrant le rapport signal sur bruit le plus élevé (suite au rapport de balayage), ce point d'accès consultera son processus *AP_Manager* pour voir s'il peut répondre à la demande de la nouvelle station sans recours au serveur. Sinon, comme nous l'avons prévu dans la solution d'équilibrage, le point d'accès enverra une requête de demande de redistribution des utilisateurs auprès du serveur d'équilibrage. Le bloc *Load_balancing_server* exécutera le processus d'équilibrage de charges pour chercher une solution globale telle que nous l'avons défini dans le chapitre 2.

4.2. Simulations MSC du système d'équilibrage

Dans ce paragraphe, nous présentons les simulations que nous avons effectuées sur le modèle SDL du réseau sans fils public. L'objectif de ces simulations est de voir si les interactions entre les différentes entités du système d'équilibrage se déroulent sans aucun blocage. C'est une validation non exhaustive du protocole d'équilibrage de charges que nous avons développé. L'environnement de validation ObjectGeode intègre l'outil MSC qui permet à l'utilisateur d'interagir avec le modèle développé pour vérifier le comportement du système dans plusieurs cas de scénarios (Sherratt, 2003). Cet environnement permet aussi de lancer une vérification automatique de la dynamique du système permettant de distinguer des états de blocage éventuels. Il présente une interface graphique permettant de solliciter le système simulé avec des entrées afin de tester sa réaction. Nous avons choisi de présenter deux cas de scénarios reliés aux particularités de la réaction du système. Dans ces deux simulations une nouvelle station vient d'être activée dans le réseau sans fils : une unité de donnée de la couche application arrive au niveau MAC de la station. Dans cette trame, la couche application transmet ses besoins en termes de qualité de service (ici la bande passante, mais ça peut aussi être le délai maximal et le taux de pertes toléré). La station demande alors connexion auprès du point d'accès avec le rapport SNR le plus élevé, ici AP1. Elle transmet alors une trame *Req_connect* à AP1. La simulation illustrée dans la figure 3.13 présente le cas où le point d'accès AP1 est capable de répondre aux besoins de la nouvelle station sans recours au serveur.

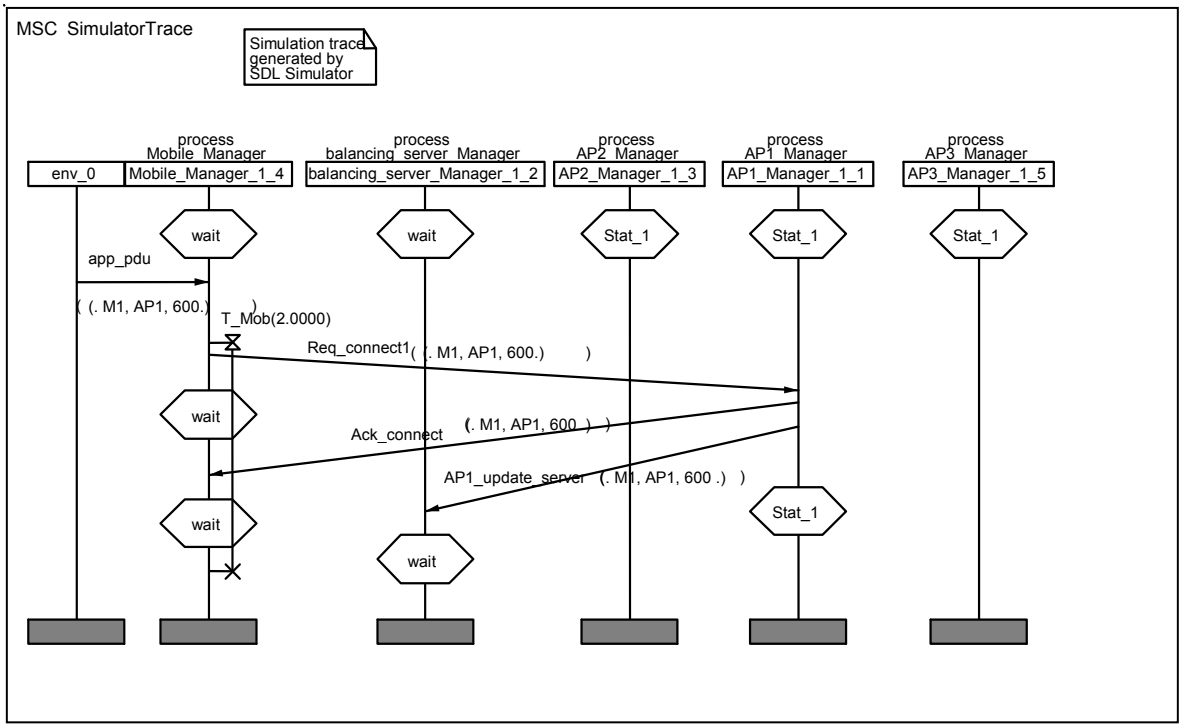

Fig. 3.13 Simulation MSC (pas de recours au serveur)

Le point d'accès répond positivement à la demande puis met à jour le serveur d'équilibrage. Nous signalons que les échanges du standard 802.11 n'ont pas été intégrés dans les simulations. Nous nous sommes intéressés uniquement aux nouveaux échanges que nous avons définis. La mise à jour du serveur est effectuée juste après l'envoi de l'acquittement positif à la station, et ce, sans attendre qu'elle finisse la procédure d'association.

Dans le deuxième scénario, simulé dans la figure 3.14, le point d'accès ne peut pas répondre aux besoins de la station. Il transmet alors une demande de redistribution au serveur d'équilibrage de charges. La solution trouvée par le processus d'équilibrage est diffusée vers l'ensemble des points d'accès du réseau. Ceci permet d'assurer toutes les réassociations nécessaires pour l'admission de la nouvelle station avec les besoins QoS qu'elle a demandé.

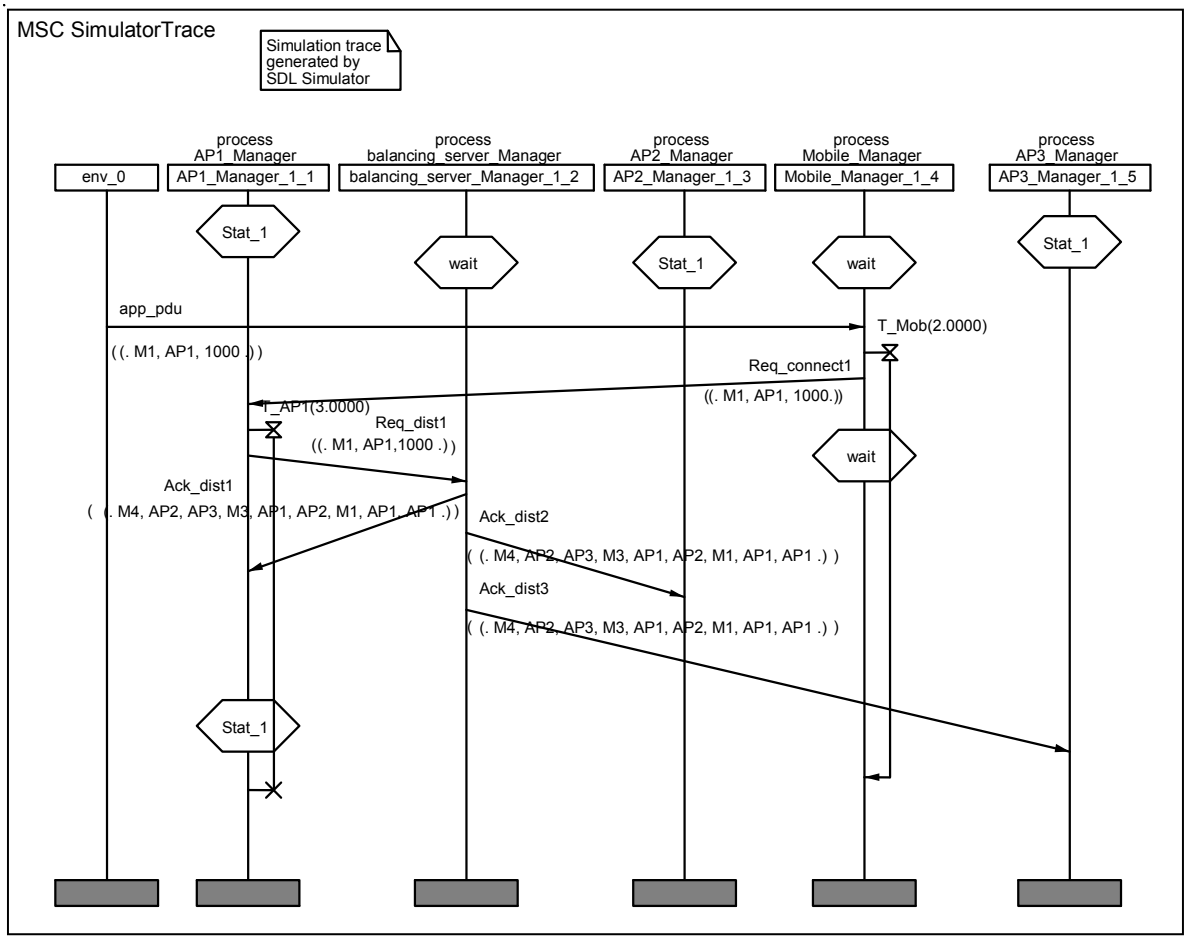

Fig. 3.14 Simulation MSC (recours au serveur)

Nous avons testé à travers d'autres scénarios la stabilité du système et l'absence des états de blocage. Nous avons remarqué qu'il n'y a pas de blocage dans les interactions entre la station mobile, les points d'accès et le serveur d'équilibrage de charges. Notons que les valeurs choisies pour les temporisateurs dépendent entre autres de la couche physique utilisée et les vitesses supportées.

5. Adaptation du protocole d'équilibrage au standard 802.11

Dans la démarche que nous avons suivie avec un objectif d'implémentation de la solution d'équilibrage sur une plate forme réelle, nous nous sommes fixé comme objectif de minimiser les modifications par rapport au standard 802.11. Nous avons pensé notamment à intégrer les nouveaux échanges pour la mise en place du système d'équilibrage de charges dans les échanges du standard 802.11 existants. Nous avons aussi pensé à réduire le temps nécessaire à une station pour terminer sa procédure de connexion au réseau (balayage + authentification + demande de connexion + association). Ainsi, nous avons rajouté les éléments d'information de la requête *Req_connect* et *Ack_connect* respectivement dans les trames requête et réponse d'authentification. En effet une seule trame d'authentification est définie par le standard 802.11. Les numéros de séquence 1 et 2 correspondent respectivement à une requête et réponse d'authentification. La nouvelle structure de la requête d'authentification est présentée par la figure 3.15.

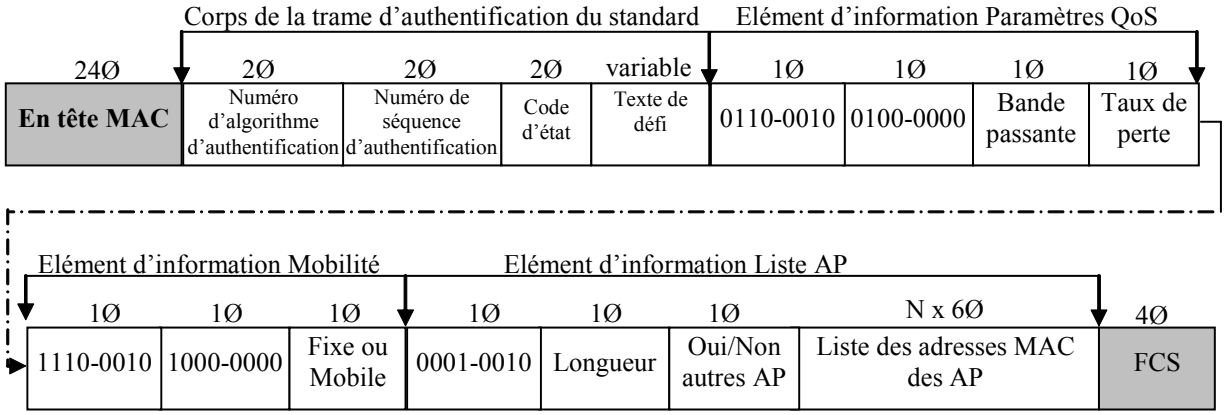

Fig. 3.15 Structure de la nouvelle trame d'authentification

La structure de la réponse d'authentification est présentée dans la figure 3.16. Le corps de cette trame est identique à celui de la requête d'authentification.

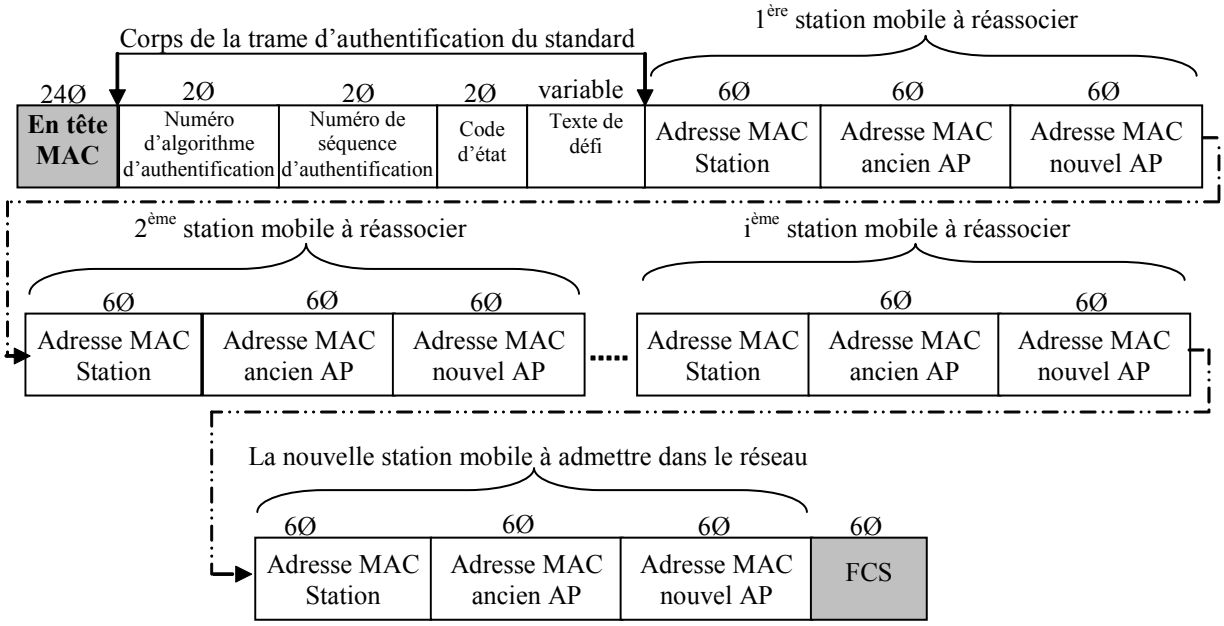

Fig. 3.16 Structure de la nouvelle trame : réponse d'authentification

La valeur du champ *Code d'état* permettra de montrer si la réponse d'authentification est positive ou négative.

- Dans le cas d'une réponse négative, ceci peut être dû soit à l'authentification, soit à la demande de qualité de service de la station. Si la raison est l'impossibilité de l'authentification, nous gardons les mêmes valeurs du code d'état définies par le standard pour justifier le refus d'authentification. Dans le cas d'une réponse négative à cause de l'incapacité du réseau à répondre aux besoins de QoS de la station, nous pouvons définir de nouvelles valeurs du code d'état parmi celles qui ne sont pas utilisées.
- Ce champ sera utilisé dans le cas d'une réponse positive pour informer du nombre de stations à réassocier.

Pour les nouvelles requêtes échangées entre les points d'accès et le serveur d'équilibrage de charge nous gardons les mêmes formats définis dans le paragraphe 3. Cependant la trame *Update_server* peut être intégrée dans la trame ARP ordinairement diffusée par un point d'accès sur le système de distribution pour informer les autres APs de l'AID d'une station venant de s'associer. En plus, étant données les vitesses supportées par les systèmes de distribution (Ethernet à 100 Mbps), nous considérons que les délais de transmission des requêtes entre les points d'accès et le serveur n'affectent pas beaucoup le temps total de connexion.

6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit un ensemble de nouvelles primitives nécessaires pour la mise en place du système d'équilibrage de charges. Ces primitives sont échangées sur le lien sans fils entre les points d'accès et les différentes stations mobiles. Sur le lien filaire, elles circulent entre les points d'accès et le serveur d'équilibrage de charges. En plus du format des nouvelles primitives qui reste conforme aux formats des trames de gestion définis par le standard 802.11, nous avons proposé l'extension de celles qui sont déjà définies par le standard. Ainsi nous avons fourni le format des nouvelles trames d'authentification modifiées. Nous avons présenté plusieurs scénarios mettant en œuvre ces échanges. Nous avons aussi élaboré un modèle SDL du réseau sans fil public avec l'ensemble de ses entités. Ce modèle a servi pour la validation des nouveaux échanges ainsi définis. Les simulations effectuées avec MSC montrent l'absence de tout blocage dans la communication entre les stations mobiles, les points d'accès et le serveur d'équilibrage de charge. Nous voyons que ce nouveau système peut être intégré dans un réseau 802.11 réel ou simulé pour l'évaluation des performances de l'approche d'équilibrage pour le support de la qualité de service.

Dans le chapitre suivant, nous allons procéder à des simulations permettant d'évaluer les apports de notre approche d'équilibrage de charge.

Références

Doldi, L. (2003). Validation of communications systems with SDL. Wiley, 2003.

Fliege, I., A. Geraldy, R. Gotzhein, T. Kuhn et C. Webel (2005). Developping safety-critical real-time systems with SDL design patterns and components. Computer networks, Elsevier. Vol. 49, pp. 689-706

Gast, M. (2002). 802.11 Wireless networks : the definitive guide. O'reilly, 2002.

ISO (1989a). ISO Information processing systems- Open systems interconnection – LOTOS – A formal description technique based on temporal ordering of observation behaviour, ISO 8807, 1989.

ISO (1989b). ISO Information processing systems- Open systems interconnection – ESTELLE – A formal description technique based on a extended state transition model, ISO 9074, 1989.

ITU (1993). International Telecommunication Union. Langage de description et de spécification du CCITT, Recommandation Z.100, 1993.

ITU (1996). International Telecommunication Union. Diagramme de séquence des messages, Z.120, 1996.

Jabri, I., N. Krommenacker, A. Soudani et T. Divoux (2006). Load balancing approach for wireless IEEE 802.11 QoS enhancement. Personal Wireless Communications "PWC'06", Springer, Lecture Notes in Computer Science, ISBN 978-3-540-45174-7, pp 88-99, 2006.

Jiang, M., M. Groble, A. Neczwid et A. Willey (2006). Modeling real-time communication systems: practices and experiences in Motorola. Journal of Visual Languages and Computing, Elsevier. Vol. 17, pp. 584-605

Kuorilehto, M., M. Hannikainen, T.D. Hamalainen (2008). Rapid design and evaluation framework for wireless senor networks. Ad Hoc Networks, Elsevier. Vol. 6, pp. 909-935.

Mammeri, Z. (2000). SDL modélisation de protocoles et systèmes réactifs. Paris, Hermès Sciences Publications, ISBN 2-7462-0166-6, 2000.

Mitschelle-Thiel, A. (2001). Systems engineering with SDL: developing performance-critical communication systems. Wiley, ISBN 978-0-471-49875-9, 2001.

Probert, R.L., H. Ural et A.W. Williams (2001). Rapid generation of functional tests using MSCs, SDL and TTCN. Elsevier Computer Communications, Vol. 24, No. 3-4, pp. 374–393.

Sherratt, E. (2003). Telecomunications and beyond : the broader applicability of SDL and MSC. Lecture Notes in Computer Science, Springer. LNCS 2599, ISBN 978- 3-540-00877-4.

Chapitre 4

Evaluation des performances de l'approche d'équilibrage de charge

1. Introduction

Maintenant que le système d'équilibrage de charge (algorithme d'équilibrage et nouvelles primitives) a été détaillé dans les chapitres 2 et 3, il est nécessaire de comparer les performances de ce système en termes de QoS par rapport au système fonctionnant selon le standard IEEE 802.11. Plusieurs approches sont alors possibles. La première approche consiste à tester le système sur une plateforme réelle de réseaux sans fils. Cette approche présente plusieurs difficultés liées aux possibilités limitées d'intervenir sur les softwares des équipements réseaux (cartes sans fils et points d'accès) mais aussi à des considérations au niveau de la couche physique afin de forcer, par exemple, l'association d'une station mobile à un point d'accès particulier. La deuxième approche consiste à définir un modèle analytique du système d'équilibrage dans l'objectif de tester son comportement. L'un des inconvénients de cette approche réside dans les modèles des canaux physiques utilisés qui ne permettent pas de caractériser explicitement le canal sans fils en termes de métriques de qualité de service spécifiées par les utilisateurs (débits, délais,…) (Wu, 2006). La troisième approche consiste à utiliser des modèles standards des différentes entités d'un réseau sans fils définis dans des outils de simulation. On peut alors utiliser les modèles d'un simulateur pour établir le système d'équilibrage et procéder ainsi par simulation. Nous utilisons cette approche pour évaluer l'apport de notre approche dans l'amélioration de la qualité de service des réseaux sans fils. La simulation reste aussi une étape importante vers une implémentation réelle de l'approche.

Dans la suite du chapitre, nous commençons par présenter l'outil de simulation utilisé pour la comparaison des performances d'un système avec ou sans équilibrage de charges : OPNET.

Nous détaillons ensuite les simulations effectuées et les résultats obtenus (Jabri, 2008). Nous finirons par une analyse générale de ces résultats et par une conclusion.

2. Présentation de l'environnement de simulation OPNET Modeler

La simulation s'impose comme la technique la plus utilisée pour évaluer les performances dans le domaine des réseaux. Elle reste un moyen très utile mais surtout le plus flexible pour prédire les performances d'un système et les comparer pour des configurations différentes. La conception et le développement de modèles utilisés dans les simulations restent déterminants pour la pertinence et la crédibilité des résultats obtenus (Pawlikowski, 2002). La technique de simulation nécessite aussi une bonne maîtrise des techniques statistiques pour l'analyse des résultats. Le choix de l'outil de simulation est important et dépend des modèles qui y sont définis. Les principaux outils de simulation existant sont : Network Simulator (NS, 2007) qui est "open source" et OPNET (OPNET, 2007) qui est un produit commercial mais qui existe en version académique. Ces deux outils sont les plus utilisés quand il s'agit de simulation de réseaux au niveau académique, commercial et industriel (Breaslu, 2000). Du point de vue des chercheurs, NS-2 fournit des résultats de simulations comparables à OPNET et reste attractif puisqu'il est gratuit. Mais la panoplie plus complète de modules de OPNET Modeler offrant beaucoup plus de fonctionnalités que NS-2 est très attractive pour les opérateurs réseaux (Lucio, 2003). La simulation d'un réseau nécessite tout d'abord de définir la problématique et l'objectif de la simulation et de concevoir et développer ensuite le modèle du réseau à simuler. Il est aussi nécessaire de définir les paramètres de performances à collecter suite à l'exécution de la simulation.

Nous avons utilisé l'outil OPNET, disponible en version académique au CRAN pour modéliser et simuler le fonctionnement d'un réseau public sans fils 802.11. Cet outil appartient à la famille de logiciels développés par la société MIL3. Cette société produit des outils logiciels pour la modélisation, la simulation et l'analyse de performances des réseaux de communication et de systèmes répartis. OPNET est utilisé par une large communauté pour une conception souple et évolutive de réseaux de communication : produits, technologies et protocoles. OPNET Modeler est un outil de simulation à évènements discrets qui permet de spécifier graphiquement des modèles. Il permet d'étudier les performances des systèmes existant sous des conditions variables. Il contribue au développement et l'optimisation de nouveaux protocoles de communication et l'analyse de l'impact des technologies émergentes.

Avec OPNET Modeler, il est possible de comprendre le comportement dynamique des réseaux et d'intégrer les simulations dans des outils de gestion et de planification de réseaux.
OPNET utilise un modèle hiérarchique qui se base sur des frontières physiques et fonctionnelles décrivant d'une façon précise les topologies et les flux échangés dans un système de communication. Ce modèle hiérarchique présente trois niveaux de description. Pour chaque niveau, en plus de la large bibliothèque d'objets disponible pour l'utilisateur, de nouveaux objets peuvent aussi être créés. Le plus haut niveau de cette hiérarchie est le modèle réseau qui présente la topologie physique d'un réseau de communication. Un éditeur de projets permet de définir la position géographique du réseau, sa topologie et les caractéristiques des entités communicantes. L'éditeur de projets permet aussi de choisir les statistiques à récupérer sur le réseau, exécuter les simulations et visualiser les résultats. Il peut être aussi utilisé pour la création de modèles de processus ou de nœuds, de construire de nouveaux formats de paquets ou de créer de nouveaux filtres et paramètres.
Le deuxième niveau est un modèle de nœud. Le modèle d'un nœud (station, routeur, switch,…) est défini à l'aide de blocs ou modules décrivant le fonctionnement d'un nœud tels que les modules émetteur ou récepteur sans fils. Ces modules sont reliés par des flux de paquets objets *packets stream* ou *statistic wire*. Le comportement et le fonctionnement de chaque module peuvent être décrits par un modèle de processus qui constitue alors le 3ème niveau de la hiérarchie. Les modèles de processus sont représentés par des machines à états finis FSM. Des icônes représentent les états et des liens représentent les transitions entre les états. Les opérations effectuées dans chaque état ou par chaque transition sont décrites par des codes en C ou C++. Un éditeur de processus permet alors de créer des modèles de processus qui contrôlent les fonctionnalités d'un modèle de nœud créé dans l'éditeur de nœuds.

En plus de ces trois niveaux de hiérarchie, un modèle de paquet OPNET permet de définir le format et le contenu des échanges d'information. La figure 4.1 illustre le modèle hiérarchique d'OPNET. L'éditeur de projets d'OPNET permet, sur un modèle de réseau de récupérer des statistiques et les représenter sous différents types de graphiques ou de les exporter vers d'autres logiciels. Des « sondes » permettant de mesurer des paramètres préalablement définis sur OPNET peuvent être placées n'importe où dans la hiérarchie présentée précédemment.

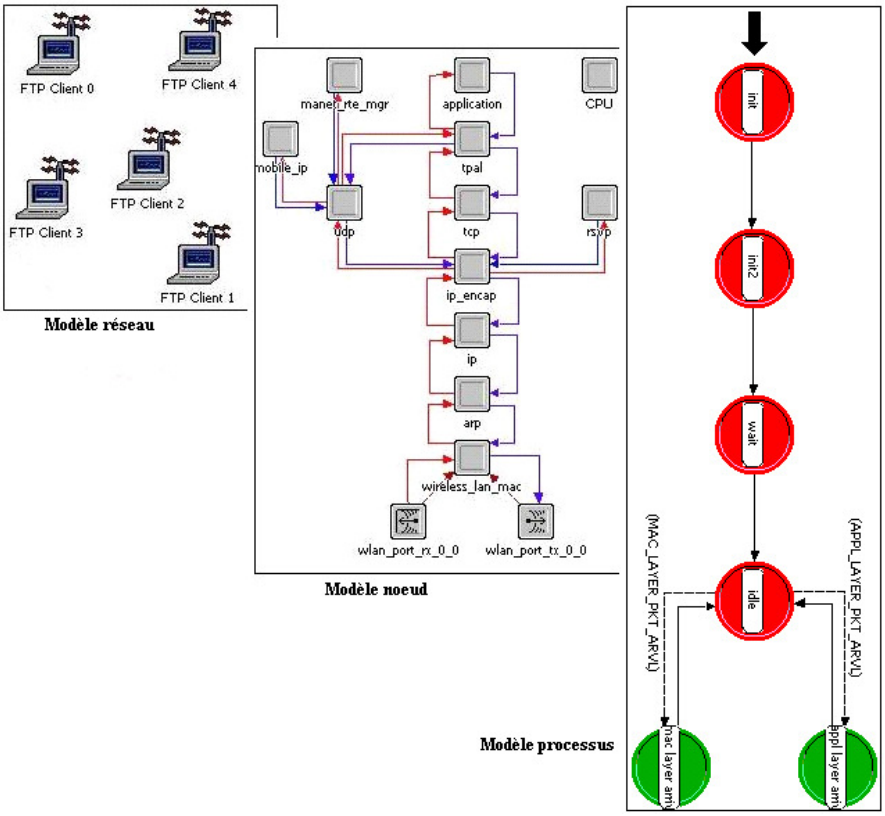

Fig. 4.1 Modèle hiérarchique d'OPNET

Le « workflow » d'une simulation sous OPNET Modeler est illustré dans la figure 4.2. Suite à la définition du modèle réseau à simuler, il faut choisir les bonnes statistiques à récupérer. Ensuite, l'exécution des simulations permet de récupérer les résultats et pouvoir les analyser.

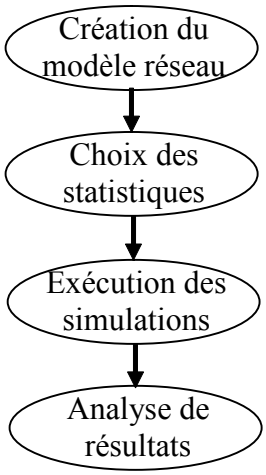

Fig.4.2 Workflow de OPNET Modeler

Pour la création du modèle du réseau public sans fils sur lequel nous allons évaluer l'approche d'équilibrage de charge, nous avons utilisé le module sans fils *Wireless Module* de OPNET. Dans ce module, plusieurs modèles de stations sans fils et de points d'accès sont récupérables par l'utilisateur. Pour chacun de ces modèles, plusieurs paramètres doivent être configurés. Le choix des valeurs adéquates pour les différents paramètres d'un modèle est déterminant pour

la qualité des résultats récupérés (Lucio, 2003). Nous avons donc été amenés à maîtriser l'effet de chaque paramètre sur le comportement du modèle. Par exemple, pour le choix des stations mobiles, plusieurs modèles sont disponibles. Le modèle *wlan_wkstn* est un modèle complet de stations sans fils 802.11. Il comporte l'ensemble des couches du modèle protocolaire TCP/IP. Le modèle en couches de ce modèle de station est présenté par la figure 4.3.

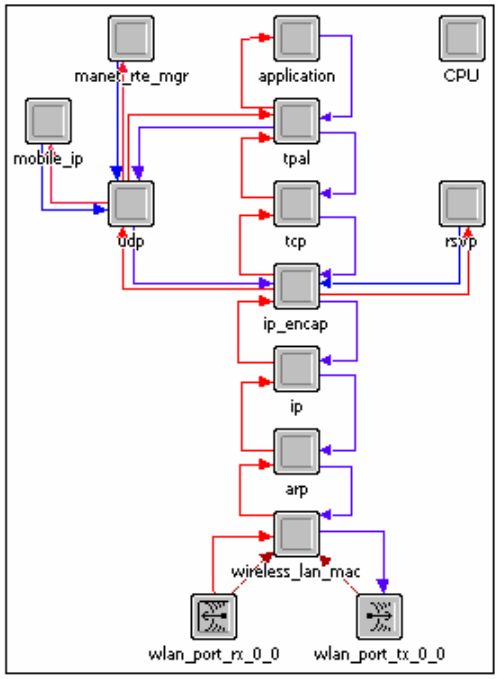

Fig. 4.3 Modèle *wlan_wkstn* d'OPNET

Le modèle *wlan_station* est un modèle de station 802.11 beaucoup plus simple. Outre les processus de transmission et de réception radio et le processus MAC, le modèle de station *wlan_station* comporte deux modèles de processus *source* et *sink* qui permettent de simuler le fonctionnement des couches supérieures. La figure 4.4 illustre l'architecture du modèle *wlan_station*.

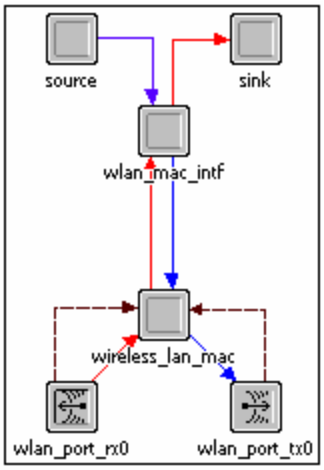

Fig. 4.4 Modèle *wlan_station* d'OPNET

Nous avons choisi de configurer les stations sans fils du réseau public à simuler selon le modèle *wlan_station*. Ce modèle est plutôt utile quand il s'agit d'étudier le comportement des couches physique et MAC 802.11. En effet, il permet entre autres (OPNET, 2007) :

- de générer un trafic complètement contrôlé par l'utilisateur
- d'évaluer les performances de la couche MAC 802.11
- de simuler les effets des paramètres sans fils indépendamment des couches supérieures
- avoir des temps de simulation relativement faibles même pour de larges réseaux sans fils

Dans l'environnement de simulation OPNET Modeler, les modèles de stations sans fils se présentent dans la bibliothèque de l'outil en version fixe ou mobile. Pour les nœuds mobiles, une trajectoire de mouvement peut être affectée au cours d'une simulation. En plus des trajectoires prédéfinies dans la bibliothèque, des nouvelles trajectoires avec des vitesses de déplacement variables peuvent être créées par l'utilisateur.

Après le choix du modèle de station, il est essentiel de configurer les paramètres de ce modèle. Les paramètres de l'interface 802.11 d'une station *wlan_station* et leurs descriptions respectives sont présentés dans le tableau 4.1 et correspondent à des paramètres de la couche physique et MAC du standard 802.11.

Tableau 4.1 Liste des paramètres de l'interface 802.11

Paramètre de l'interface 802.11	**Description**
BSS identifier	Indique l'identité du BSS auquel est rattaché le nœud sans fils
Access Point Functionality	Indique si le nœud est activé comme point d'accès ou une simple station sans fils
Physical characteristics	Indique la couche physique utilisée (FHSS, DSSS,…)
Data rate	Indique le débit de transmission du nœud (1, 2, 5,5 et 11 Mbps)
Channel settings	Paramètres du canal (largeur de la bande et fréquence minimale)
Transmit Power (W)	Indique en Watts la puissance de transmission
Packet Reception-Power Threshold	Définit le seuil de la puissance de réception du récepteur radio (en dBm). Les paquets avec une puissance inférieure à ce seuil ne sont pas décodés par le récepteur et seront considérés comme bruit
RTS Threshold	Spécifie en octets le seuil pour l'utilisation de l'échange RTS/CTS précédant la transmission de trames de données
Fragmentation Threshold	Spécifie en octets le seuil de fragmentation ainsi que la taille des fragments à l'exception du dernier
AP Beacon Interval	Spécifie en secondes le Target Beacon Transmission Time c'est-à-dire la période de transmission de Beacon par le point d'accès
Roaming Capability	Permet aux stations la recherche d'autres AP et de changer d'AP quand le signal devient faible
PCF-Parameters	Spécifie les paramètres MAC 802.11 quand le mode PCF est utilisé
HCF-Parameters	Indique si les facilités introduites par le mode HCF sont supportées

En plus des paramètres de l'interface sans fils, d'autres attributs doivent être affectés à chaque nœud sans fils du modèle. Par exemple le paramètre *Destination Address* indique l'adresse du nœud destination. Cette adresse peut être choisie aléatoirement quand la valeur de ce

paramètre est *random*. Il est aussi possible d'envoyer les paquets en diffusion. Les *Traffic Generation Parameters* spécifient les paramètres du trafic généré par un nœud source. Les paramètres d'un trafic seront la date de démarrage du trafic (*start time*), la durée de l'état activé (*On state time*) et la durée de l'état désactivé (*Off state time*). Les arguments qui définissent la taille des paquets et le débit de leur envoi sont : le temps d'inter arrivée des paquets (*Interarrival Time*), la taille des paquets (*Packet Size*), le seuil de segmentation (*Segmentation Size*) et le temps d'arrêt (*Stop Time*). Un modèle de distributions et des arguments peuvent êtres choisis pour chacun de ces paramètres. Le paramètre *Traffic Type of Service* indique la classe de service affectée aux paquets générés par une source. Ce paramètre n'est pas utilisé dans les modèles de nœuds sans fils.

Les limitations du modèle : le modèle des stations sans fils 802.11 dans OPNET Modeler (version 11.5) présente plusieurs limitations par rapport aux spécifications du standard. Parmi ces limitations nous pouvons citer :

- le mode PCF tel qu'il est implémenté dans le simulateur ne fonctionne pas correctement si l'environnement est bruité
- les couches physiques FHSS et infrarouge ne sont pas modélisées
- à l'exception des trames balises *beacon*, les trames de gestion définies par le standard ne sont pas modélisées. La transmission périodique des trames balises dans le mode ad hoc n'est pas modélisée
- le mode d'économie d'énergie du standard (*Power Save Mode*) n'est pas modélisé
- le débit de transmission d'un nœud sans fils pour la transmission des données est statique au cours d'une simulation.
- Le modèle ne présente pas un support complet du protocole 802.11e
- Le roaming et le mode PCF sont implémentés séparément et ne peuvent pas être utilisés simultanément.
- …

3. Simulations et résultats

3.1. Portées des transmissions

Une fois que les modèles des entités sans fils (stations et point d'accès) à utiliser sont choisis, on s'intéresse à la configuration topologique de l'ensemble des entités définissant la topologie du réseau public sans fils. Pour ce faire, nous nous somme intéressés à la portée de transmission de ces différentes entités. La distance maximale, permettant une communication fiable entre deux nœuds sans fils est une fonction de trois paramètres : la puissance de transmission du nœud émetteur, le modèle de propagation et de pertes et le seuil de la puissance de réception du nœud récepteur. Dans l'environnement OPNET Modeler, la configuration de ces paramètres permet de modéliser des réseaux sans fils avec des distances de communication supérieures à 300 m. En effet le standard IEEE 802.11 limite les distances de communications entre les nœuds sans fils à 300 m, sans obstacles (Labiod, 2004). Au-delà de ce seuil les communications ne sont plus possibles : Les paquets envoyés seront considérés comme bruit et peuvent causer une dégradation des performances globales du réseau sans fils (Labiod, 2004).

Le modèle de propagation et de perte des nœuds sans fils étant défini au niveau de OPNET Modeler, nous avons décrit un scénario de simulation pour déterminer en fonction de la puissance d'émission et le seuil de puissance de réception des nœuds sans fils, les distances de communication maximales entre les nœuds. Ceci nous permettra dans la suite de choisir convenablement les distances entre les différentes entités du réseau public sans fils à étudier. Nous avons alors défini un scénario de réseau 802.11 en mode infrastructure. Nous avons utilisé les modèles de nœuds que nous utiliserons pour les scénarios d'évaluation de l'approche d'équilibrage. Dans ce scénario, une station sans fils est placée à une distance de 750 m du point d'accès. Elle se déplace vers le point d'accès avec une faible vitesse de 0,2m/s. Au cours de son déplacement, elle envoie en continu un trafic vers le serveur destination relié à travers un switch Ethernet au point d'accès. La topologie du réseau simulé est présentée par la figure 4.5.

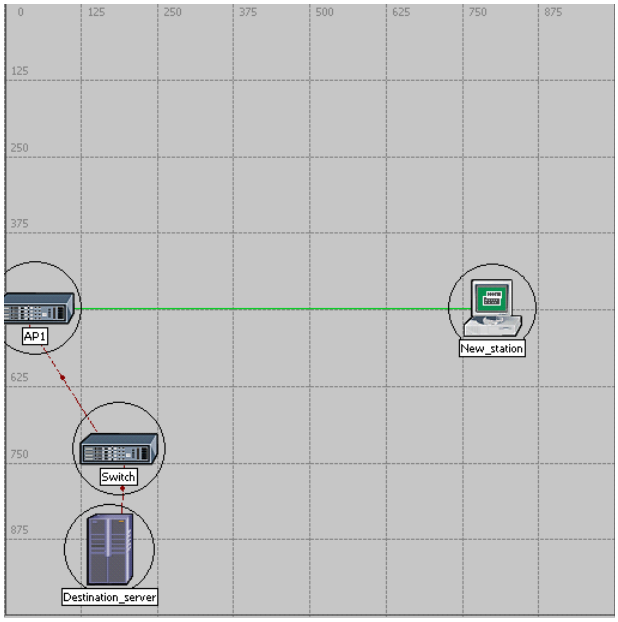

Fig. 4.5 Scénario pour la détermination de la portée des communications

Au niveau de la station mobile, nous avons récupéré pour chaque paire de paramètres (puissance d'émission (W), seuil de puissance de réception (db)) le rapport signal sur bruit SNR en fonction de la distance séparant la station du point d'accès. La figure 4.6 représente la variation du rapport SNR en fonction de la distance pour plusieurs valeurs du couple de paramètres.

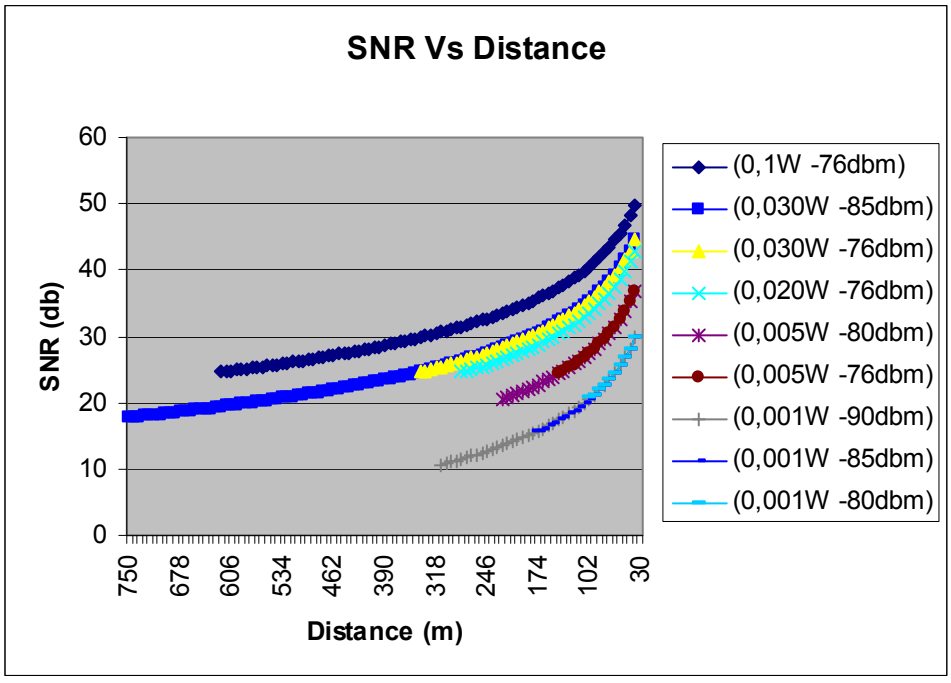

Fig. 4.6 SNR en fonction de la distance

La première valeur récupérée correspond au premier paquet correctement reçu au niveau du point d'accès et donc à la portée de communication des modèles de nœuds utilisés. Nous avons illustré dans le tableau 4.2 les portées maximales de communication entre deux nœuds

du réseau pour les différentes valeurs de la puissance de transmission et du seuil de la puissance de réception.

Tableau 4.2 Portées des communications

Transmit Power (W)	Packet Reception-Power Threshold (dbm)	SNR_min (db)	Distance (m)
0,100	-76	24,59	620,4
0,030	-85	17,69	750
0,030	-76	24,63	339,6
0,020	-76	24,58	282
0,005	-80	20,59	224,4
0,005	-76	24,56	145,2
0,001	-90	10,64	310,8
0,001	-85	16,52	159,6
0,001	-80	20,7	102

Pour la configuration des paramètres de transmission, il faut à la fois être compatible avec les portées réelles des nœuds 802.11, le niveau typique de bruit dans les environnements indoor pour les cartes 802.11b (égal à -90dbm pour les cartes Cisco (Na, 2006)) et les valeurs de SNR qui doivent être supérieures à 10 db pour une bonne qualité de réception des paquets (Na, 2006) (Yong, 2007) (les valeurs idéales sont comprises entre 20 et 30 db).

Pour toutes ces raisons, nous avons choisi de travailler avec une puissance de transmission des nœuds égale à 0,001W et un seuil de puissance de réception des paquets égal à -90dbm. Nous travaillons donc avec des portées de communication égales à environ 310 m.

3.2. Comparaison des performances de notre approche d'équilibrage de charge par rapport au standard

Dans ce paragraphe, nous allons présenter une comparaison des performances en termes de support de qualité de service de notre approche d'équilibrage de charge par rapport au fonctionnement ordinaire du standard 802.11. Nous nous proposons ici de faire abstraction du temps de convergence de l'algorithme d'équilibrage de charge et du temps mis en œuvre pour assurer les échanges entre les différentes entités du réseau sans fils. Il est vrai que tout ce temps est important quand il s'agit de certains types d'applications. Mais nous pensons aussi qu'une fois les charges sont équilibrées dans un Hot Spot, il n'y a plus d'échanges du protocole ni de bande passante supplémentaire consommée. L'arrivée ou le départ de stations mobiles vers ou à partir de ce Hot Spot ne se fera pas en masse. Si, dans certains cas, le recours à l'équilibrage de charges sera nécessaire, il ne concernera qu'un nombre faible de réassociations (en effet le système fût déjà équilibré). Il en découle que les échanges

protocolaires entre stations et points d'accès, consommant de la bande passante, sont limités (les échanges entre les points d'accès sont supposées s'effectuer sans contraintes, le système de distribution peut être de l'Ethernet Gigabit). En plus, l'étude d'intégration des nouveaux échanges nécessaires au système d'équilibrage de charge, effectuée dans le 3ème chapitre, a montré qu'il est possible d'intégrer la plupart de ces nouveaux échanges dans les trames de gestion du standard. Ce qui réduira sensiblement la consommation de la bande passante liée à la mise en place de l'équilibrage.

La comparaison de performances en termes de qualité de service est faite sur la base du premier exemple présenté dans le chapitre 2. Le modèle de réseau sur lequel nous avons effectué l'évaluation est donc celui présenté par la figure 4.7. Dans ce modèle nous rappelons que trois points d'accès AP1, AP2 et AP3 couvrent l'espace réseau de 500x500m. Les stations du réseau peuvent générer 3 types de trafics : Données, vidéo et voix. Les paramètres de génération de ces différents trafics tels que nous les avons configurés sur le modèle OPNET sont donnés par le tableau 4.3.

Tableau 4.3 Paramètres des trafics

Profile	Temps inter paquets	Taille paquets (Octets)	Seuil de segmentation (octets)	Débit
Voix	Constant (0,02)	Constant (96)	1500	38,4 Kbps
Vidéo	Constant (0,1)	Constant (12520)	1500	1000 Kbps
Données	Exponentiel (0,05)	Constant (3750)	1500	600 Kbps

Une nouvelle station M14 (ou *New_station_video*) vient d'entrer dans la zone de couverture du point d'accès AP2. Les interfaces sans fils sont paramétrées pour fonctionner à 11 Mbps pour les stations sans fils et les points d'accès. Les liens Ethernet connectant les points d'accès, le switch et le serveur destination sont de type 100BaseT.

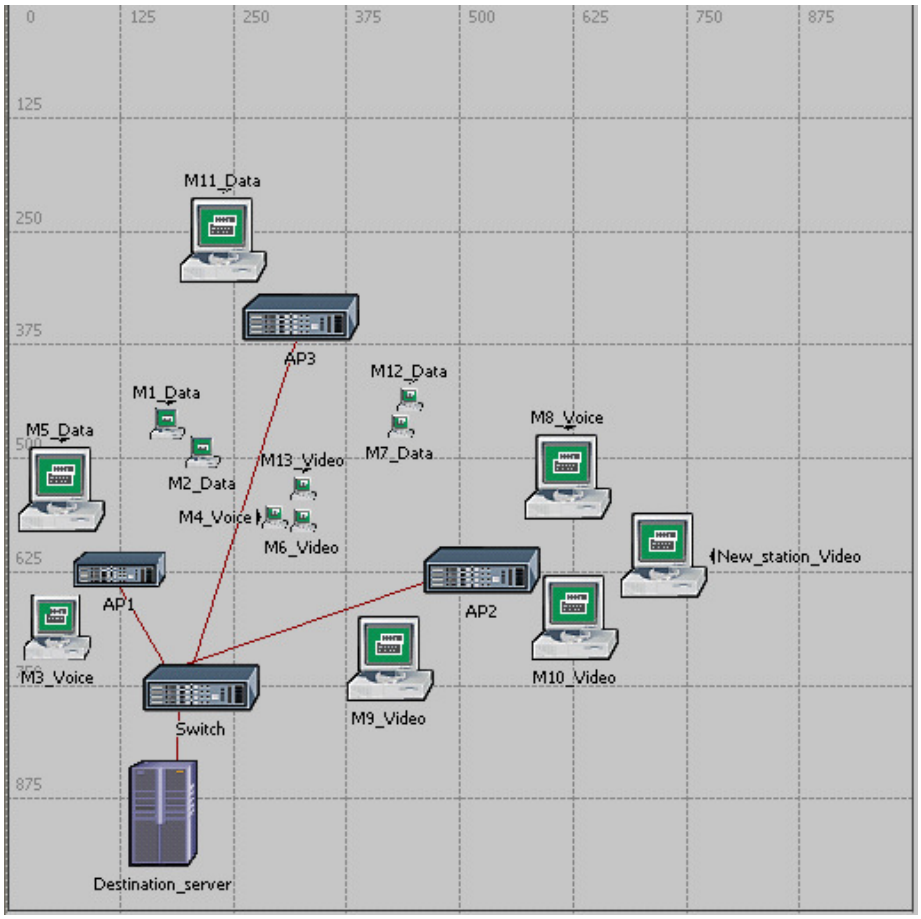

Fig. 4.7 Modèle OPNET du réseau public sans fils

Selon les recommandations du standard, la nouvelle station serait associée à AP2. Cependant, dans ce cas, les charges des points d'accès deviennent complètement déséquilibrées : AP2 est beaucoup plus chargé que les autres. L'exécution de notre algorithme d'équilibrage de charge permettra d'avoir des points d'accès équitablement chargés. L'objectif des simulations sera donc de comparer, sur des paramètres de qualité de service, les performances du réseau sans fils : en 1er lieu dans le cas où le réseau est non équilibré et dans un second cas où le réseau est équilibré (notre algorithme d'équilibrage a alors été appliqué). Le tableau 4.4 résume les distances entre les stations et les points d'accès et représente l'état d'association des stations sans fils aux points d'accès selon le standard 802.11 et selon notre algorithme d'équilibrage de charge.

Tableau 4.4 Etat d'associations avant et après l'équilibrage

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	Nouvelle station (M14)
Distance à AP1 (m)	169	159	93	181	109	209	348	505	315	505	380	371	221	600
Distance à AP2 (m)	382	333	472	236	472	205	182	139	141	115	461	204	217	201
Distance à AP3 (m)	189	184	434	222	326	225	163	344	390	449	120	150	189	479

Zone de couverture commune	Z1	Z1		Z3		Z3	Z2					Z2	Z3	
Association selon 802.11	AP1	AP1	AP1	AP1	AP1	**AP2**	**AP2**	AP2	AP2	AP2	AP3	AP3	AP3	AP2
Association après équilibrage	AP1	AP1	AP1	AP1	AP1	**AP1**	**AP3**	AP2	AP2	AP2	AP3	AP3	AP3	AP2

Dans les deux cas nous allons récupérer un ensemble de paramètres pour l'évaluation des performances. Ces paramètres concernent les performances globales du réseau mais aussi la qualité de service au niveau de chaque station sans fils du réseau (notamment la nouvelle station entrante). Les paramètres de performances globales du réseau sans fils seront le taux de perte global sur le médium sans fils du réseau, le délai d'accès global au réseau et la bande passante disponible globale. Nous avons aussi récupéré les délais moyens au niveau de chaque BSS. Pour les stations, nous avons reporté les délais d'accès au médium.

La démarche que nous avons suivie pour les simulations est la suivante :

- modélisation sous OPNET de notre réseau
- simulation de la topologie modélisée pendant une durée de 180 secondes, dans un premier lieu en respectant juste les recommandations du standard 802.11 et dans un deuxième temps en appliquant notre algorithme d'équilibrage de charge
- analyse des résultats et des paramètres de QoS récupérés

Dans la figure 4.8 nous présentons le taux de perte de données global sur l'ensemble des liens sans fils. En kbits/sec, ce paramètre indique la quantité de données perdues sur l'ensemble des interfaces 802.11 du réseau par saturation des buffers des couches supérieures. Sur cette figure nous remarquons, qu'en utilisant l'approche d'équilibrage de charges, le taux de pertes des données dû à la saturation des buffers des couches supérieures est moins important que celui sans l'application de l'approche. Les valeurs sont pratiquement réduites de moitié.

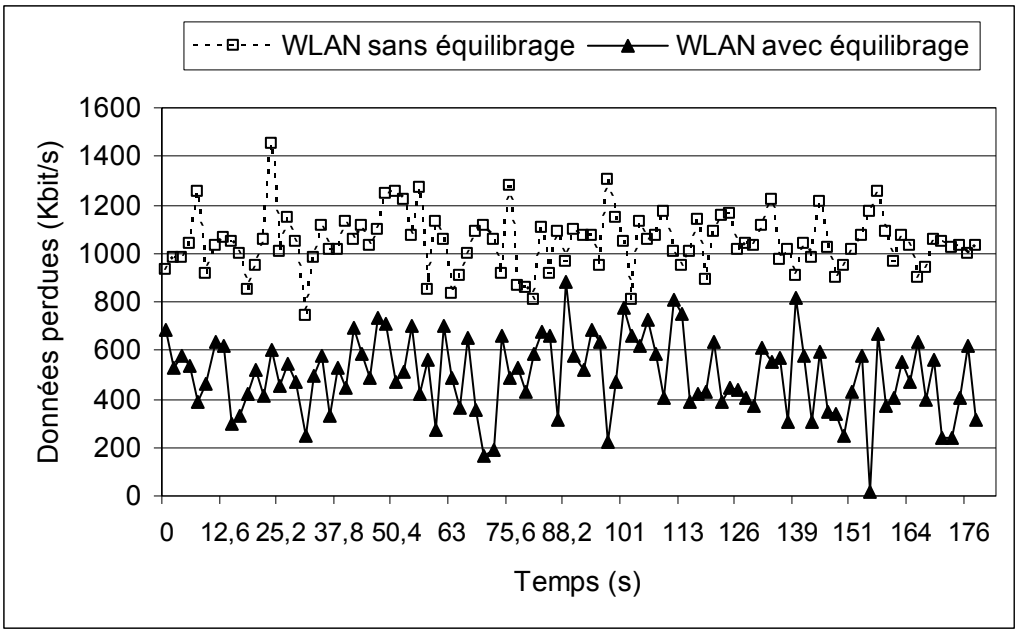

Fig. 4.8 Paquets perdus par saturation des buffers des couches supérieures

La figure 4.9 représente le taux de perte de données global du réseau dû au dépassement du seuil de retransmissions.

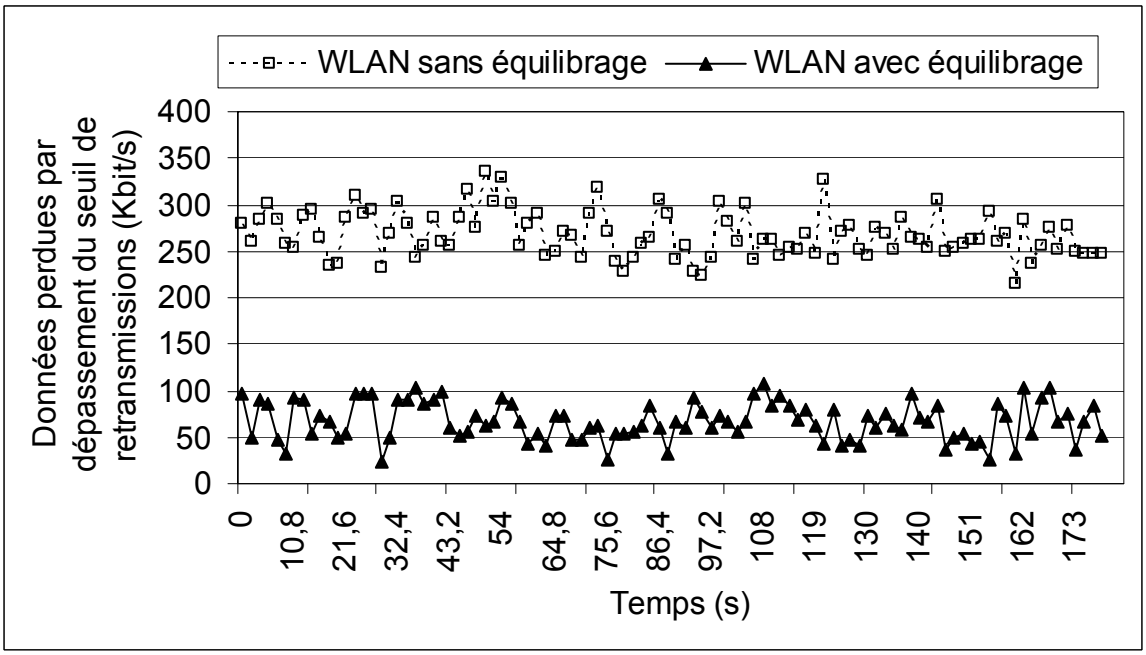

Fig. 4.9 Paquets perdus par dépassement du seuil de retransmissions

Deux seuils de retransmission sont définis par le standard (mais aussi au niveau du modèle de réseau OPNET) : un seuil de retransmission court (*short retry limit*) et un seuil de retransmission long (*long retry limit*) qui définissent le nombre maximal de tentatives de retransmissions respectivement pour les trames dont la taille est inférieure au seuil RTS/CTS et celles dont la taille est supérieure au seuil RTS/CTS.

Nous n'avons pas utilisé l'échange RTS/CTS au cours de ces 1ères simulations. La valeur du seuil de retransmission utilisée par défaut est *long retry limit*. Nous avons utilisé une valeur égale à 7 pour ce paramètre. Les trames qui n'ont pas été transmises au bout de ce seuil de retransmission sont écartées par la couche MAC. Sur la figure 4.9, nous remarquons que le taux de perte de données, écartées par dépassement de ce seuil de retransmissions, est beaucoup plus important quand notre approche d'équilibrage de charge n'est pas utilisée.

La figure 4.10 montre que le délai d'accès au médium global est plus faible dans le cas où l'approche d'équilibrage est utilisée. Le délai d'accès global au médium est une statistique globale qui représente les délais d'attente et de contention des paquets reçus au niveau MAC de la part des couches supérieures. Le délai est enregistré quand le paquet est envoyé à la couche physique pour la première fois.

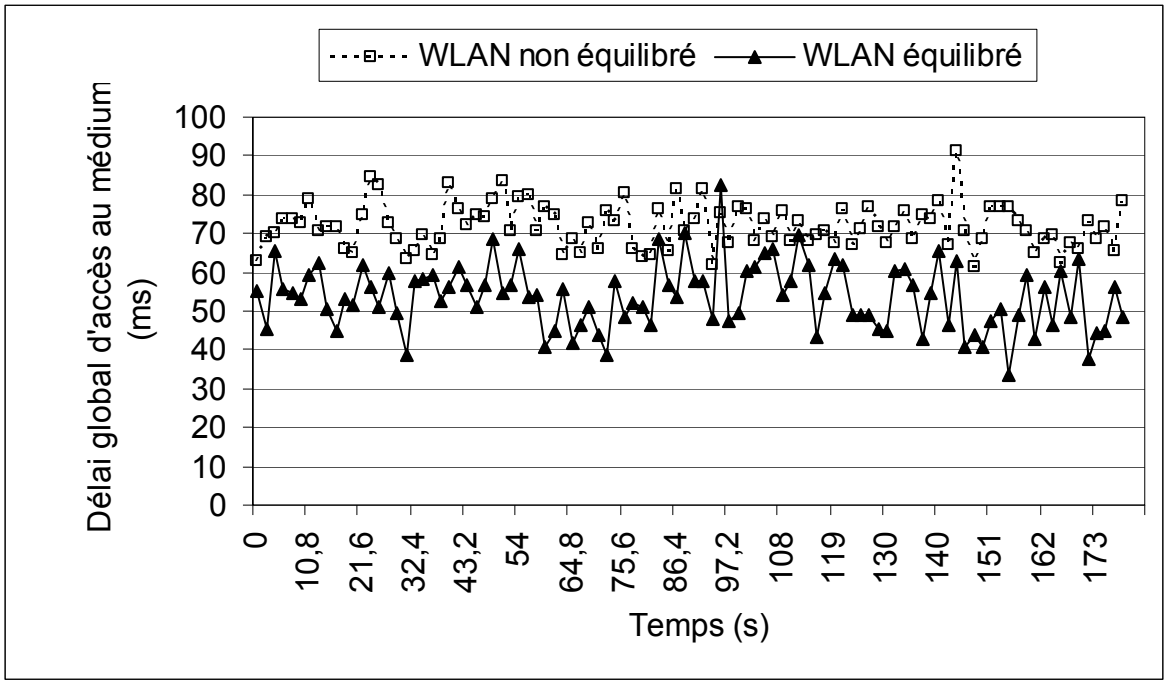

Fig. 4.10 Délai global d'accès au médium

Dans la figure suivante, nous représentons la bande passante globale utilisée sur l'ensemble du réseau. Ce paramètre mesure en kbit/s la quantité de données transmises par les interfaces sans fils des points d'accès vers les couches supérieures et donc vers le serveur de destination. Elle montre que si les recommandations du standard 802.11 ont été respectées, la quantité de données transmises aux couches supérieures est inférieure à celle des données transmises quand nous utilisons notre approche d'équilibrage de charges.

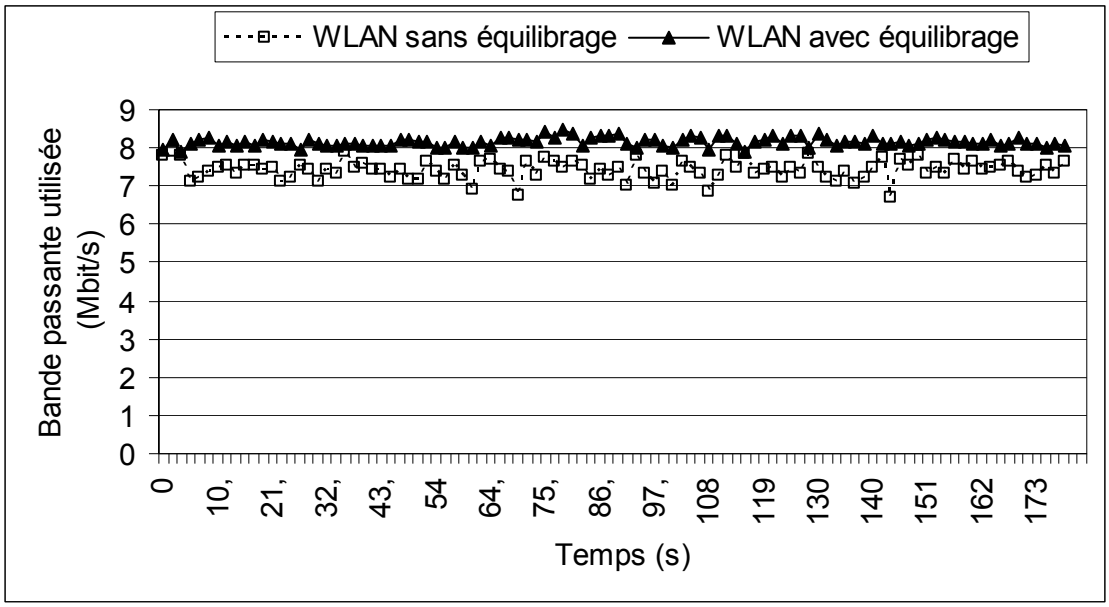

Fig. 4.11 Bande passante utilisée globale

Nous avons aussi récupéré des paramètres de qualité de service au niveau de chaque BSS. La figure 4.12 représente les délais moyens au niveau de chaque cellule BSS1, BSS2 et BSS3. Ce délai représente le temps d'attente et d'accès au médium au niveau de la source MAC et la réception de tous les fragments (si la trame est fragmentée) au niveau de l'AP. Ce temps comprend aussi le temps de relai de l'information par l'AP si la source et la destination ne sont pas du même BSS.

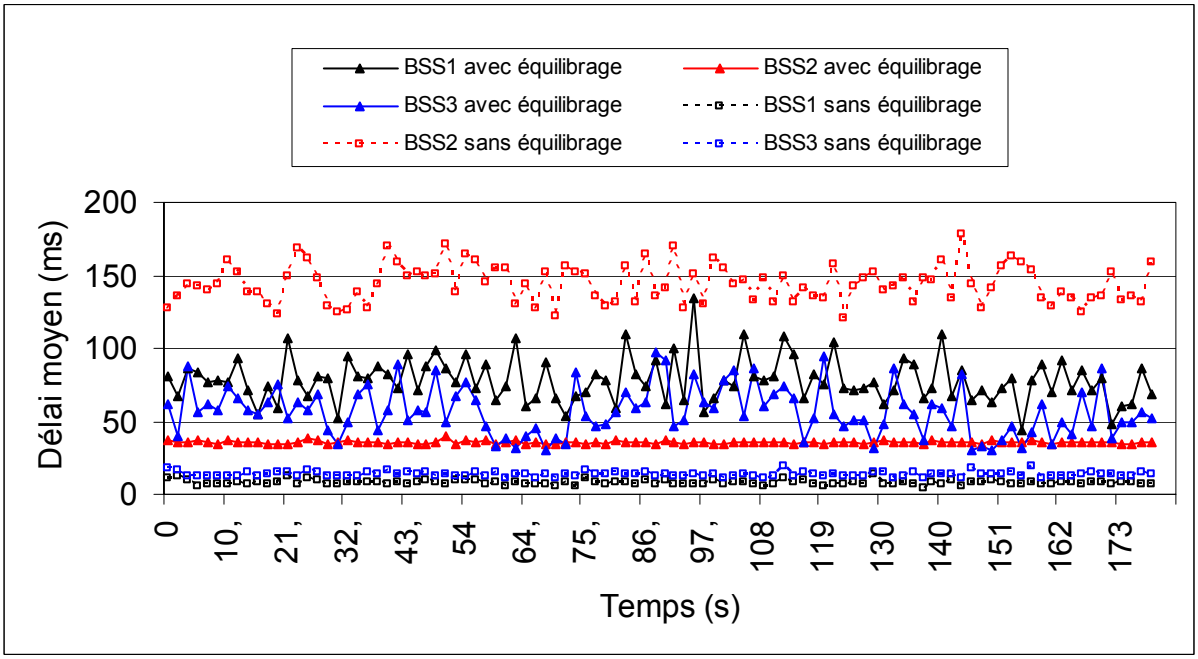

Fig. 4.12 Délai moyen pour chaque BSS

Sur cette figure, nous voyons bien que le délai moyen au niveau de BSS2 est très élevé sans équilibrage de charge (valeur moyenne de 150ms). Le fait que le point d'accès AP2 soit surchargé engendre des délais moyens important au niveau de la réception des trames. L'application de notre équilibrage de charge a permis de réduire considérablement ce délai moyen au niveau de BSS2 (valeur moyenne de 38ms). Par contre, nous voyons que l'application de notre approche implique une augmentation de délais moyens aux niveaux de BSS1 et BSS3. Ces délais restent relativement acceptables (valeur moyennes inférieures à 90ms).

Dans la figure suivante, nous avons reporté la gigue moyenne (en valeur absolue) calculée pour l'ensemble des paquets au niveau de BSS1 et BSS2. Nous remarquons que l'application de notre équilibrage de charge a permis de réduire la gigue au niveau de BSS2 mais qu'elle augmente celle au niveau de BSS1. Quand l'équilibrage est appliqué, quelques pics de la gigue sont remarquables au niveau de BSS1. Ceci nous laisse penser aux types d'applications pour lesquelles il est préférable ou non de faire un équilibrage de charges entre les points d'accès. S'il n'y avait que des applications de données au niveau de AP1, l'augmentation de la gigue moyenne serait sans conséquences graves sur le déroulement de ces applications.

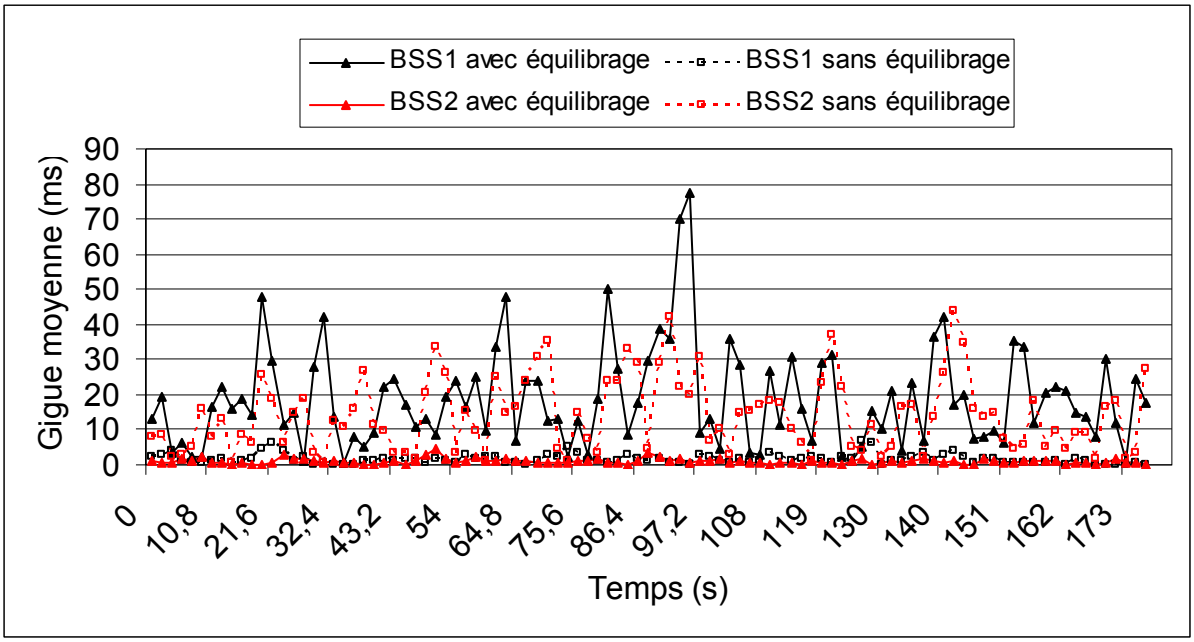

Fig. 4.13 Gigue moyenne

Nous présentons dans la figure 4.14 la variation du rapport signal sur bruit au cour de la simulation au niveau du récepteur sans fils de chaque point d'accès du réseau public. SNR est le rapport entre la puissance de réception d'un segment de paquets et la puissance moyenne de toutes les sources d'interférence.

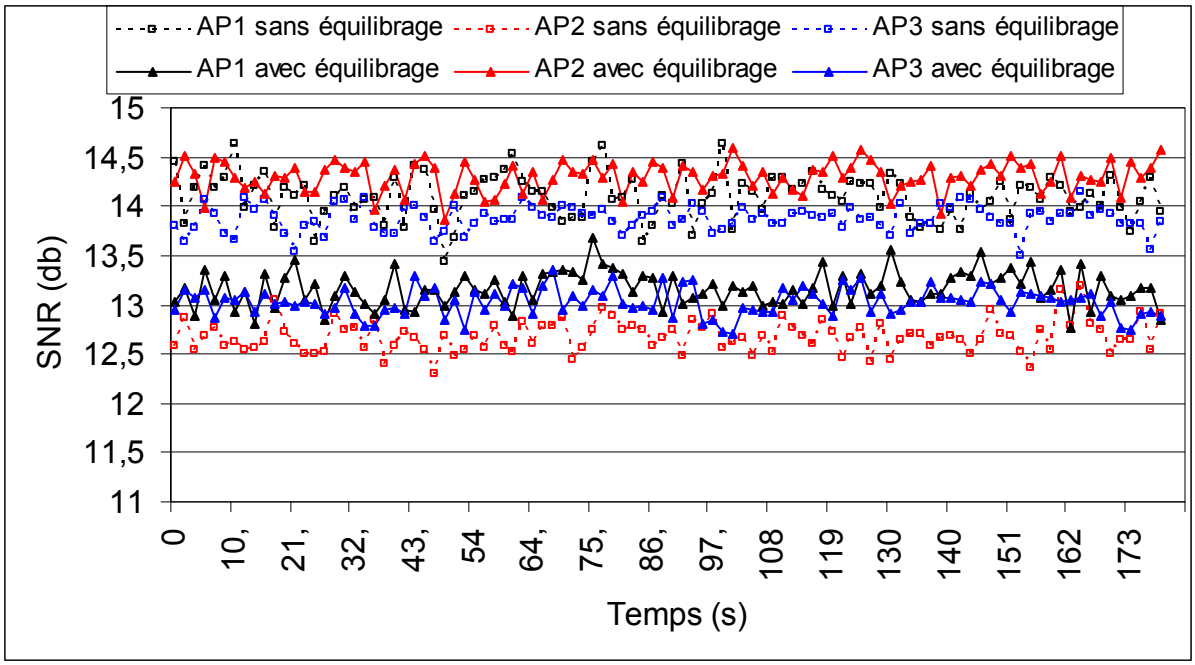

Fig. 4.14 Rapport Signal sur Bruit

En utilisant notre algorithme d'équilibrage de charge, le rapport signal sur bruit reste supérieur à 12,75db. Cette valeur est convenable puisque elle supérieure à la valeur seuil pour avoir une communication fiable (10,6db). Cependant, à l'application de l'algorithme, nous remarquons une nette amélioration du SNR pour AP2 et une dégradation pour AP1 et AP3.

Dans la suite de ce paragraphe, nous évaluons la variation des paramètres de qualité de service au niveau des stations sans fils à l'application de notre approche d'équilibrage. Nous avons choisi de présenter ces paramètres pour la station M14 puisque c'est la nouvelle station entrant dans le réseau, pour M6 puisque c'est une station qui a été réassociée lors de l'équilibrage et à une station n'intervenant pas dans l'équilibrage telle que M3. M6 et M3 exécutent des applications critiques respectivement de vidéo et de voix.

Les figures 4.15, 4.16 et 4.17 représentent les délais d'accès au médium respectivement pour les stations M3_Vo, M6_Vi et M14_Vi. Pour l'application de voix (M3), nous remarquons que le délai d'accès au médium est en moyenne légèrement supérieur lorsque l'approche d'équilibrage est utilisée. Il est en moyenne égal à 1,8ms avec des pics allant jusqu'à 5ms. Ces valeurs restent acceptables pour une application de voix.

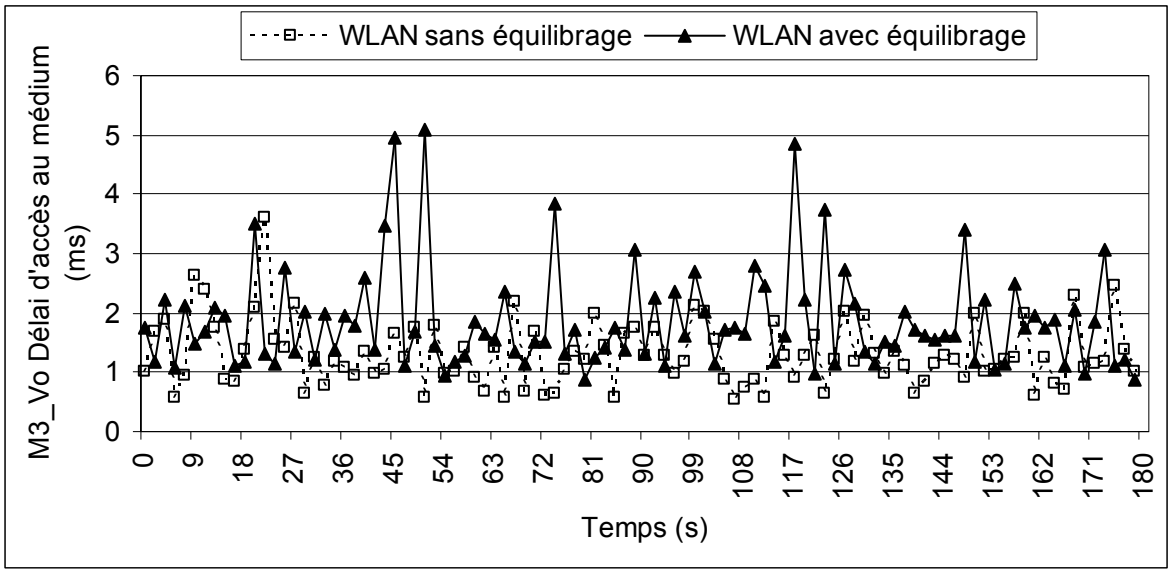

Fig. 4.15 Délai d'accès au médium M3_Vo

Pour la station M6 (Vidéo) qui a été réassocié à AP3, nous remarquons que les délais d'accès au médium présentent des pics plus importants quand l'équilibrage est appliqué mais la valeur moyenne reste pratiquement la même aux alentours de 400 ms.

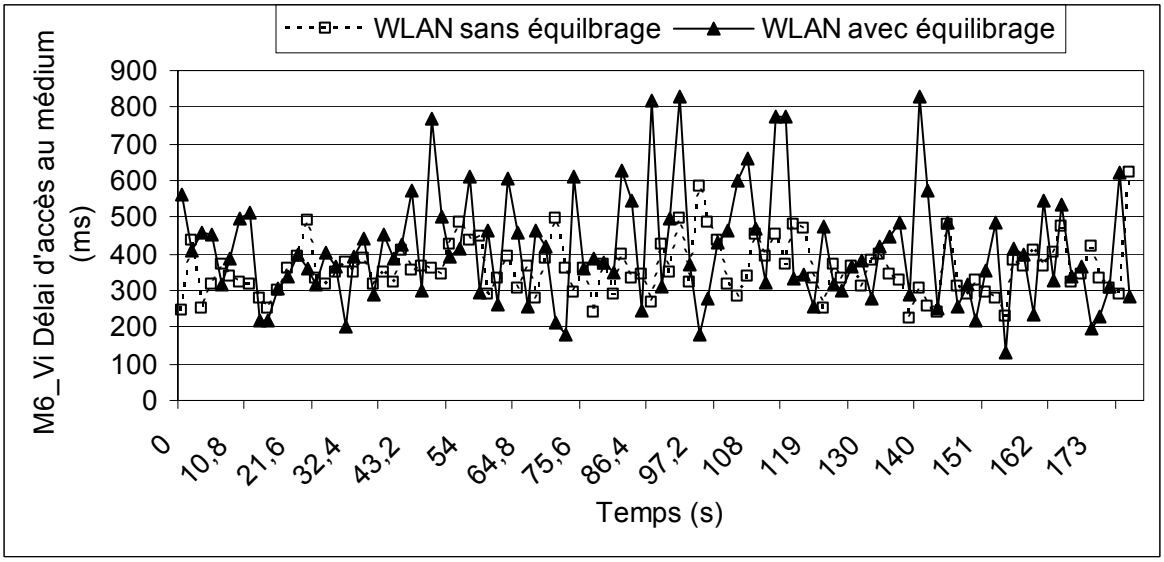

Fig. 4.16 Délai d'accès au médium M6_Vo

Pour la nouvelle station M14 venant d'entrer au réseau, nous remarquons que l'équilibrage de charge apporte une amélioration considérable sur le délai d'accès au médium. La valeur moyenne de ce délai est passée de 500ms à quelques dizaines de millisecondes.

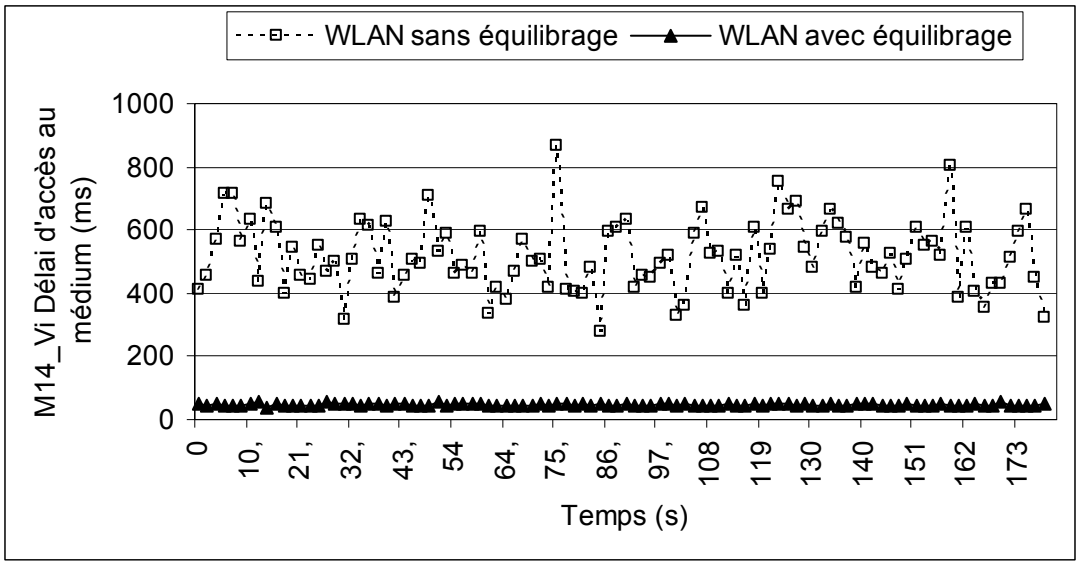

Fig.4.17 Délai d'accès au médium M14_Vi

Dans la figure suivante (4.18), nous représentons le nombre de paquets retransmis par chacune des stations mobiles. Il représente le nombre de retransmissions atteint jusqu'à transmission réussie de paquet ou jusqu'à l'atteinte du seuil de retransmission. Nous remarquons, que lorsque nous appliquons l'algorithme d'équilibrage de charge, le nombre de paquets retransmis par chaque station devient plus faible.

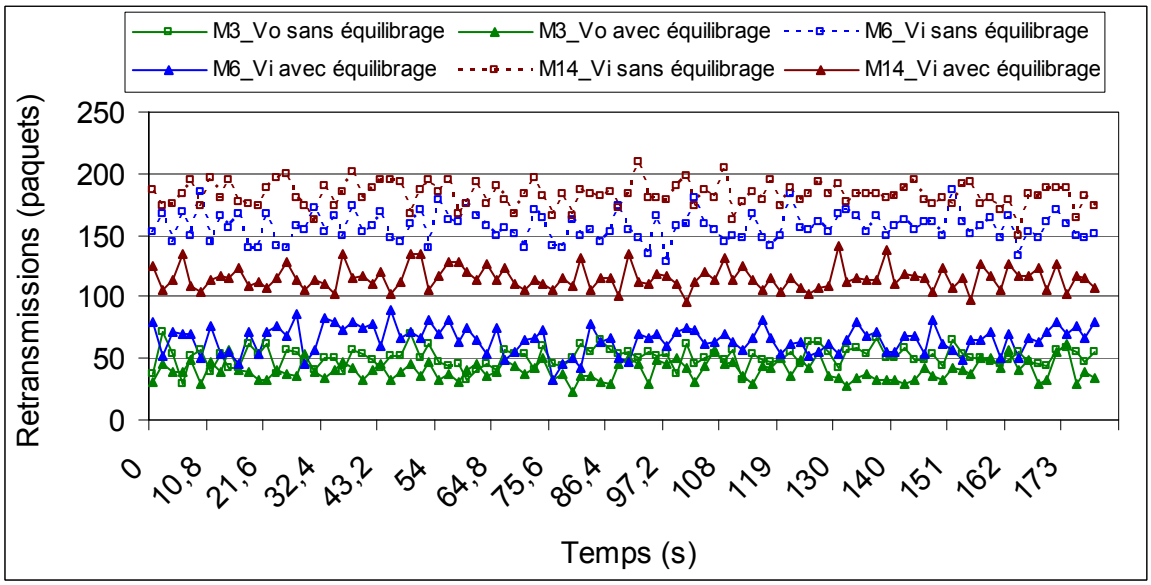

Fig. 4.18 Paquets retransmis

Dans la figure 4.19, nous représentons le nombre de slots de backoff pour chaque station. Ce paramètre représente le nombre de slots de backoff nécessaires à la station pour transmettre (lors de la contention au canal) et le nombre de slots dans la fenêtre de contention après une transmission réussie. Nous remarquons, que pour les stations M3, M6 et M14, le nombre de slots de Backoff réitérés lors de la contention au canal est beaucoup plus faible lorsque

l'algorithme d'équilibrage de charge est utilisé. Ce qui implique une meilleure optimisation de l'utilisation de la bande passante dans ce cas.

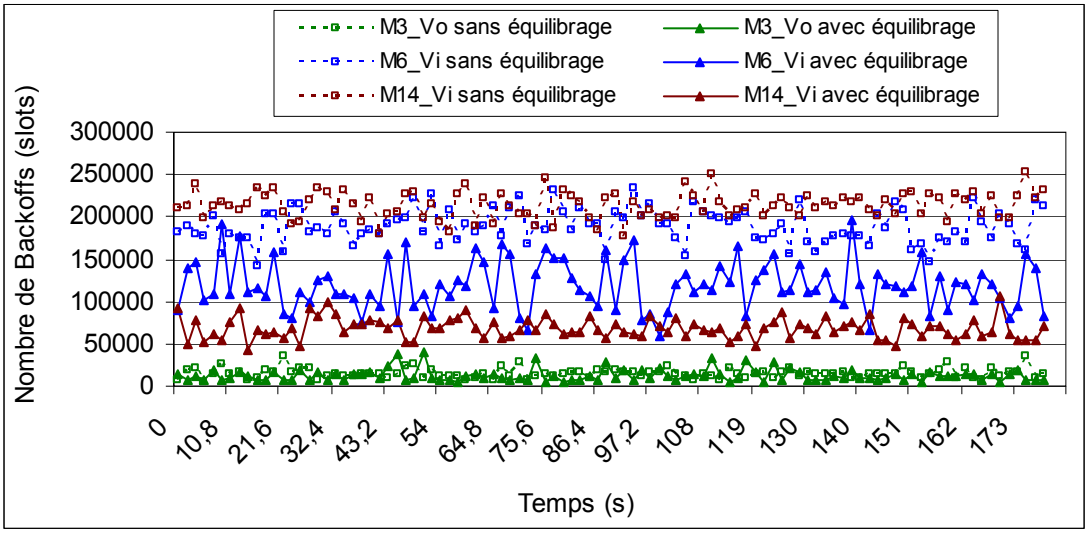

Fig. 4.19 Nombre de slots de Backoff

3.3. Effet de l'utilisation de l'échange RTS/CTS

Les tests qui ont été réalisés jusque là ont été faits sans faire appel à l'échange de paquets RTS/ CTS défini par le standard 802.11. Nous avons vu qu'il est intéressant de tester l'efficacité de l'approche d'équilibrage de charge par rapport à ce mécanisme mis en place par le comité du standard pour réduire la probabilité et le taux de perte sur le lien sans fils. Nous souhaitons voir les performances de l'équilibrage associé à l'utilisation de l'échange RTS/CTS. Pour cela nous avons utilisé le même scénario décrit dans le sous paragraphe précédent. Nous avons activé l'échange de paquet RTS/ CTS entre les stations mobiles et les points d'accès à partir d'une taille de trames de données supérieure à 256 octets.

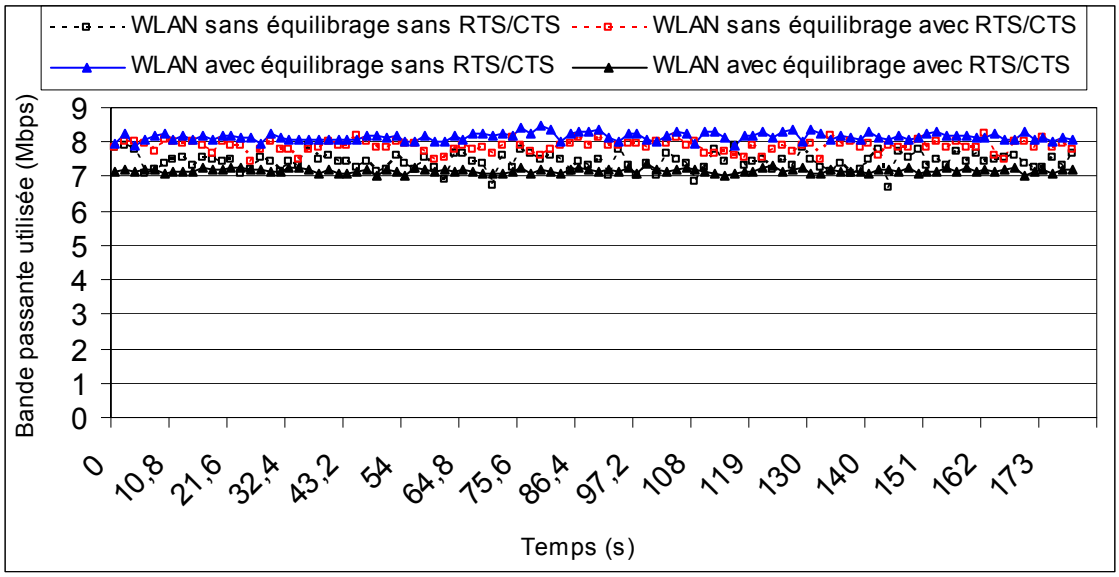

Fig. 4.20 Bande passante utilisée avec échange RTS/CTS

La figure 4.20 présente le taux de bande passante disponible pour l'ensemble des stations du réseau. Nous voyons que l'utilisation de l'approche d'équilibrage de charge permet d'avoir une bande passante disponible plus élevée par rapport à l'utilisation du standard avec l'activation de l'échange des paquets RTS/CTS.

Par contre nous étions surpris par la réduction de ce paramètre quand l'échange RTS/CTS est utilisé simultanément avec l'équilibrage de charge. Nous expliquons ceci par la réduction du rendement du canal radio quand les paquets RTS et CTS sont utilisés.

La remarque précédente est confirmée aussi pour la quantité de données perdues par saturation des buffers.

Les résultats présentés dans la figure 4.21 montrent la réduction du taux de perte quand l'équilibrage est appliqué par rapport à l'utilisation de l'échange RTS/CTS du standard.

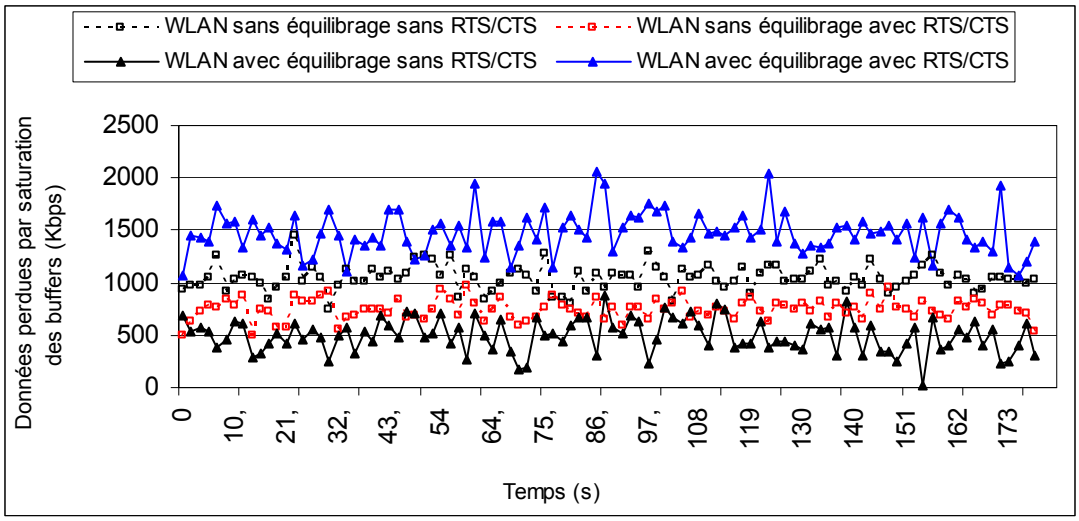

Fig. 4.21 Données perdues par saturation des buffers

Pour les données perdues sur l'ensemble du réseau par dépassement du seuil de retransmission, nous remarquons des valeurs légèrement plus réduites par l'application de l'approche d'équilibrage simultanément avec l'échange RTS/CTS (Figure 4.22).

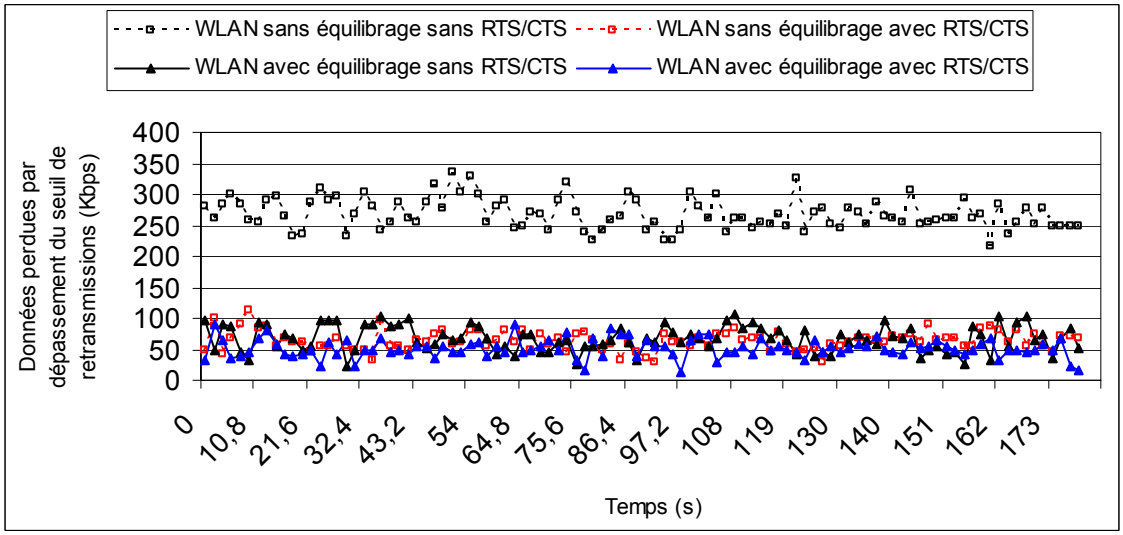

Fig. 4.22 Données perdues par dépassement du seuil de retransmissions

Concernant le comportement des stations mobile lors de l'application de l'échange RTS/CTS, nous remarquons des valeurs plus réduites de nombre de slots de backoffs utilisés par la station M14 pour accéder au canal quand l'équilibrage est utilisé par rapport à l'utilisation de l'échange de paquets RTS/CTS. Ce comportement est encore meilleur quand l'échange RTS/CTS du standard est utilisé conjointement avec notre approche d'équilibrage.

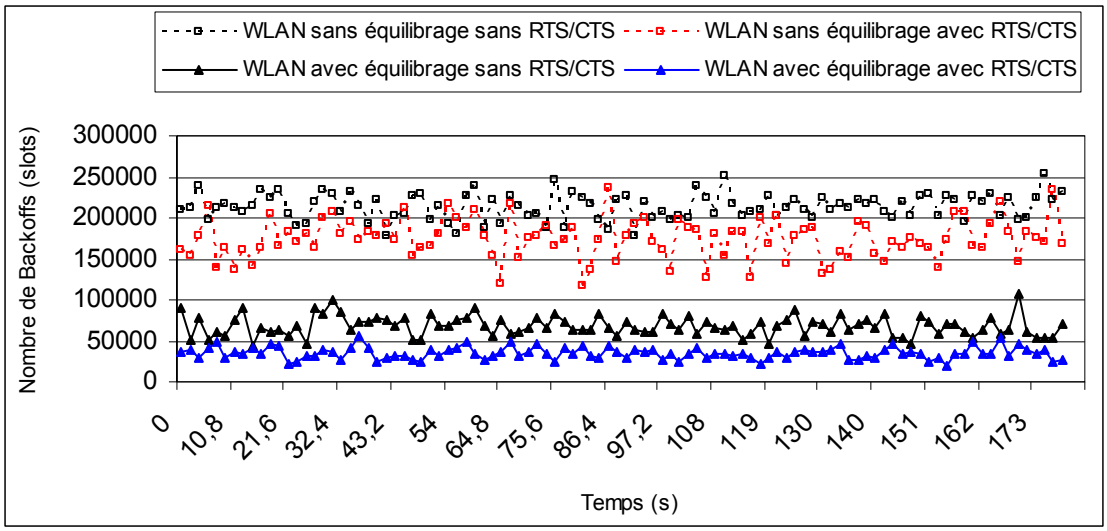

Fig. 4.23 Nombre de slots de Backoff de M14

La figure 4.24 montre des délais d'accès au médium comparables quand l'équilibrage de charge est appliqué avec ou sans échanges RTS/CTS. Ce délai est largement réduit par rapport à l'utilisation de l'échange RTS/CTS sur le standard 802.11.

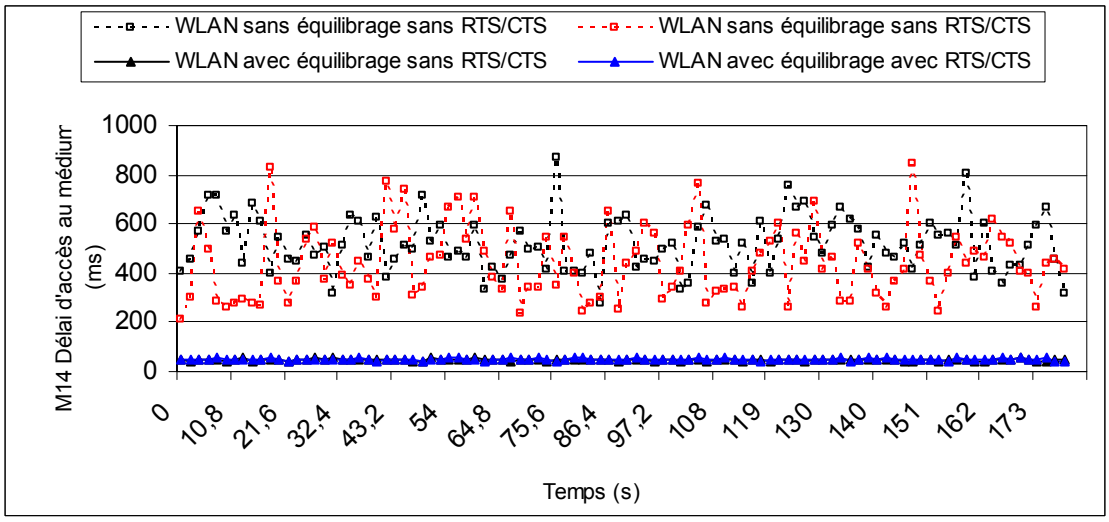

Fig. 4.24 Délai d'accès au médium M14

Dans la figure 4.25 nous avons tracé le taux de pertes de données pour dépassement du seuil de retransmissions au niveau de la nouvelle station M14. Nous remarquons un taux de perte pratiquement nul quand l'approche d'équilibrage est utilisée conjointement avec l'échange de paquets RTS/CTS.

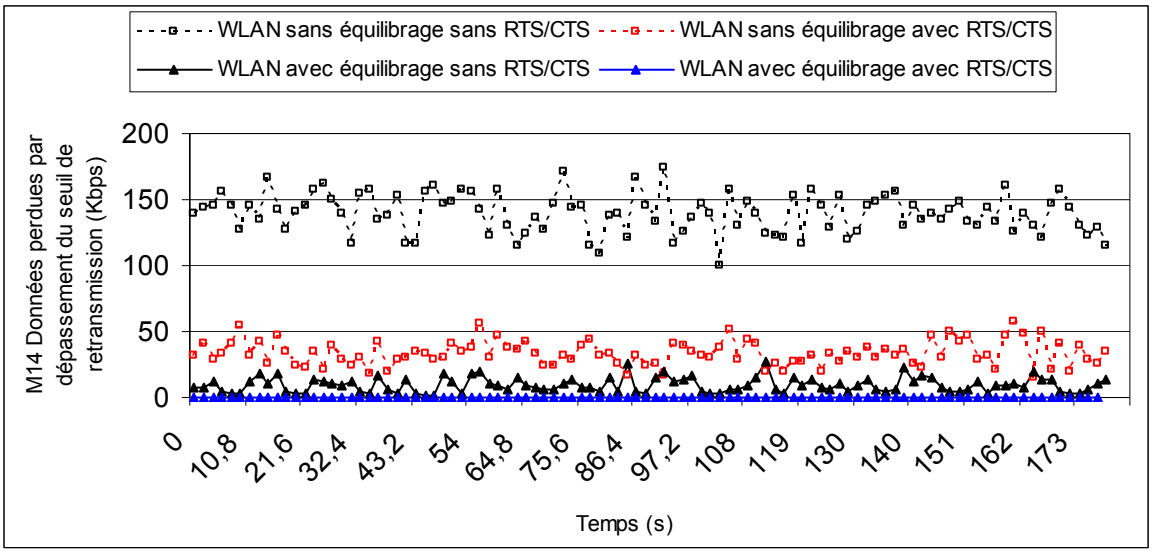

Fig. 4.25 Données perdues par dépassement du seuil de retransmissions M14

Pour la station M6_Vidéo, nous avons remarqué que le nombre de transmissions représenté par la figure 4.26 a été considérablement réduit quand l'échange RTS/CTS est utilisé conjointement avec l'approche d'équilibrage.

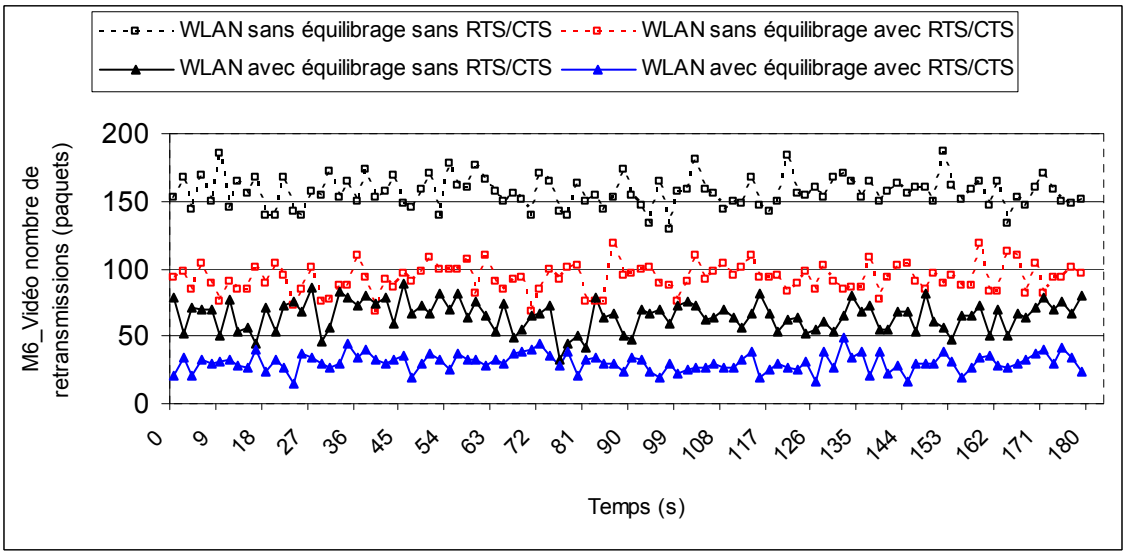

Fig. 4.26 Nombre de retransmissions M6_Vidéo

Pour la station M6, quand il est uniquement utilisé avec le standard 802.11, l'échange RTS/CTS réduit le délai d'accès au médium. Cependant pour cette station, l'utilisation de l'équilibrage de charge et de l'échange RTS/CTS, entraîne une augmentation considérable des délais d'accès au médium, avec des pics de 1,8 s. En effet, quand le réseau est équilibré, la station M6 se trouve dans la cellule BSS2 avec 2 stations avec un trafic de voix. Le rendement du canal pour M6 est donc réduit puisque elle était dans BSS1 avec une seule station avec une application de Voix : le seuil RTS/CTS est fixé à 256 octets, seules les stations avec un trafic de voix n'utilisent pas l'échange RTS/CTS.

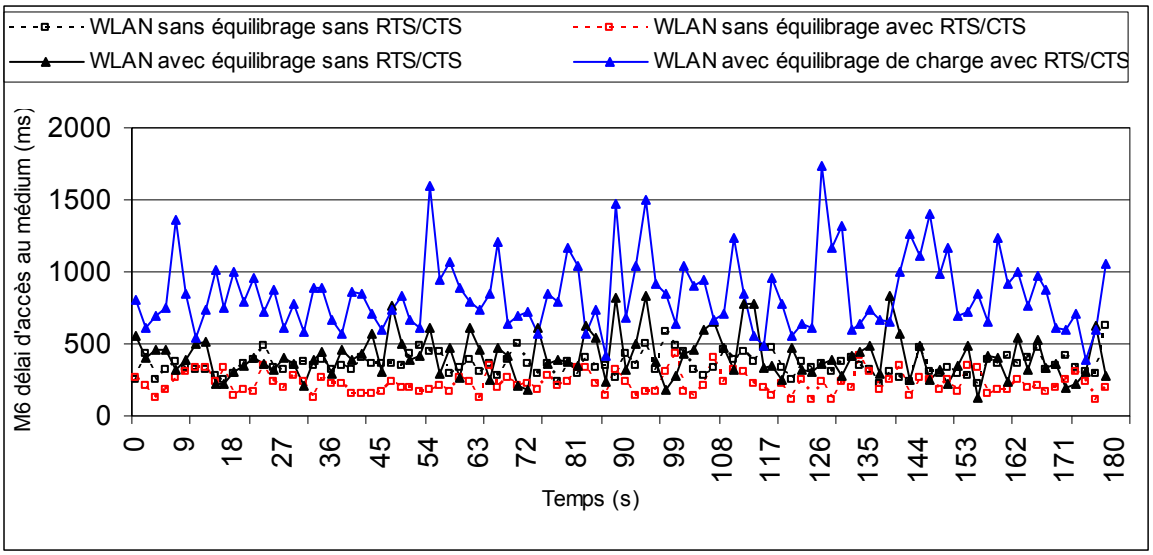

Fig. 4.27 Délai d'accès au médium M6_Vidéo

Pour la station M3 associée avec AP1 avec une application de voix et qui n'est pas réassociée lors de l'équilibrage de charge, nous avons déjà vu que le délai d'accès au médium augmente de quelques millisecondes lorsqu'on applique l'équilibrage sur le réseau. Sur la figure 4.28, nous remarquons que l'approche d'équilibrage permet des délais d'accès au médium plus faibles par rapport à l'application de l'échange RTS/CTS. Mais que l'application simultanée de cette technique avec notre approche d'équilibrage donne des pics de délais assez élevés allant jusqu'à 45 ms.

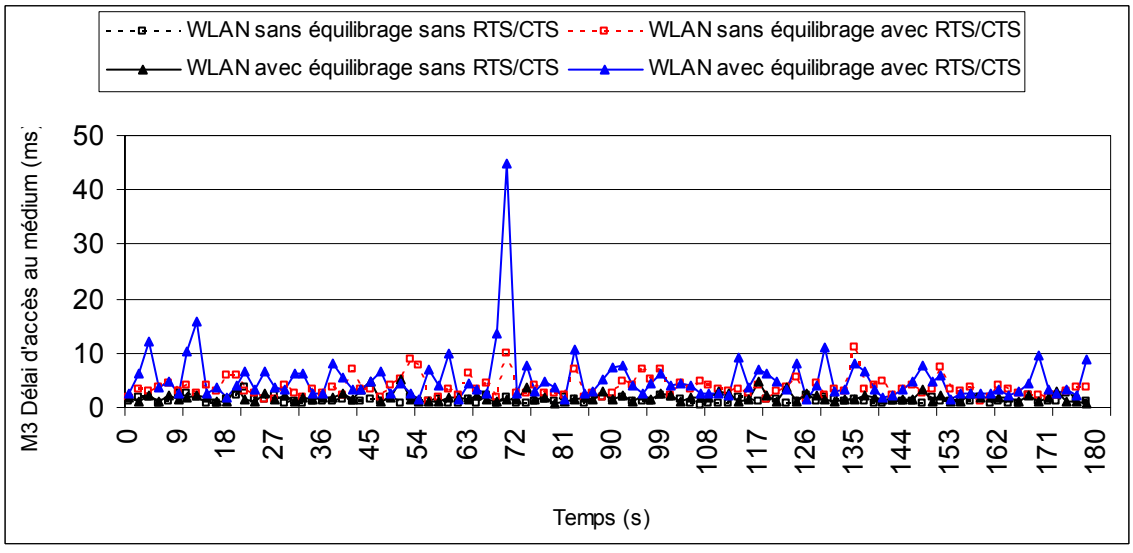

Fig. 4.28 Délai d'accès au médium (M3_Voix)

Nous voyons aussi sur la figure 4.29 que le nombre de retransmissions de paquets pour M3 a été réduit par l'utilisation de l'équilibrage par rapport à l'échange RTS/CTS. Quand l'équilibrage est appliqué avec l'échange RTS/CTS, le nombre de paquets retransmis augmente.

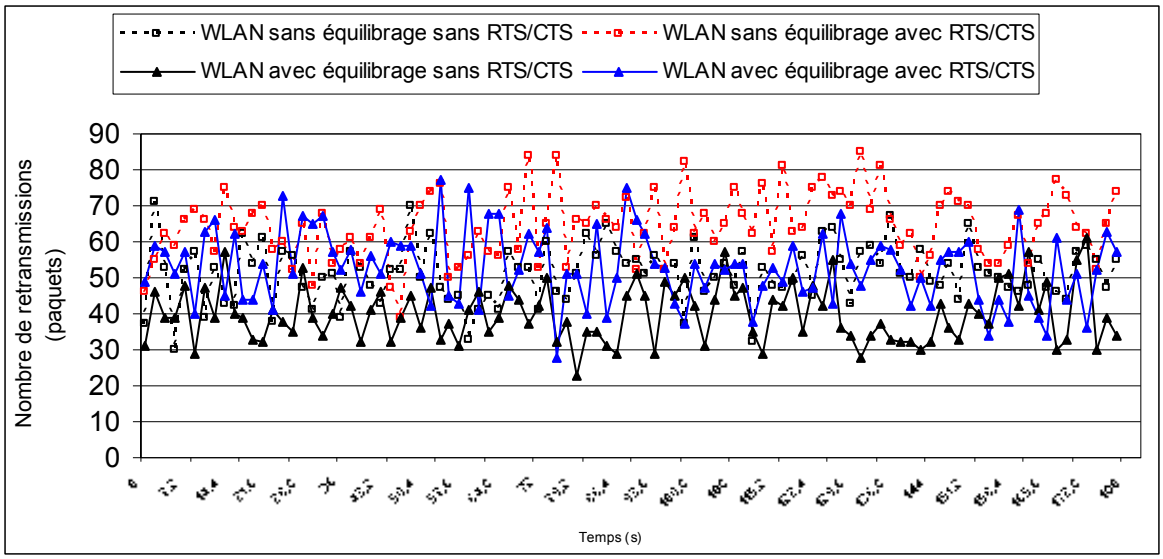

Fig 4.29 Nombre de paquets retransmis M3_Voix

3.4. Evaluation des améliorations apportées à notre approche

Dans ce paragraphe nous allons évaluer l'amélioration de notre approche d'équilibrage de charge proposée au chapitre 2. Cette amélioration consiste à interdire la réassociation des stations supportant des trafics vidéo et voix lors de l'opération d'équilibrage de charges afin de ne pas avoir de rupture de service. Pour cette raison nous avons simulé le réseau public présenté dans la figure 2.8. L'état initial d'association entre les stations mobiles (entre autre la nouvelle station M16_Vi venant d'entrer dans le réseau) et les points d'accès, est illustré par le tableau suivant :

Tableau 4.5 Etat d'association entre stations et points d'accès

	x	y	Distance à AP1	Distance à AP2	Distance à AP3	Zone de couverture	Association selon 802.11	Association avec équilibrage δ=20%	Association avec équilibrage δ=10%
M1	62,7	773	160,6	485,4	500,3		AP1	AP1	AP1
M2	52,9	571	90,1	475,2	352,4		AP1	AP1	AP1
M3	125	514	111,0	415,1	260,6	Z1	AP1	AP1	AP1
M4	251	533	156,0	289,0	200,2	Z4	AP1	AP1	AP1
M5	257	622	132,0	268,0	283,3	Z4	AP1	AP1	AP1
M6	125	398	227,0	459,9	206,4	Z1	AP3	AP3	**AP1**
M7	186	425	209,1	393,6	159,4	Z1	AP3	AP3	AP3
M8	316	480	239,8	254,4	133,3	Z4	AP3	AP3	AP3
M9	437	422	372,2	221,3	134,8	Z2	AP3	AP3	AP3
M10	502	410	434,0	216,2	187,9	Z2	AP3	AP3	AP3
M11	512	478	414,0	147,6	228,3	Z2	AP2	**AP3**	**AP3**
M12	467	527	355,8	113,9	229,3	Z2	AP2	AP2	AP2
M13	367	569	248,4	167,6	225,9	Z4	AP2	AP2	AP2
M14	335	718	229,7	211,5	371,1	Z3	AP2	**AP1**	**AP1**
M15	396	751	298,9	180,3	410,2	Z3	AP2	AP2	AP2
M16	680	694	559,3	169,7	496,4		AP2	AP2	AP2
M17	673	525	557,0	178,6	390,9		AP2	AP2	AP2

Avec un seuil d'équilibrage δ=20%, nous avons effectué des simulations sur la configuration donnée par le standard 802.11 et celle correspondant à notre algorithme d'équilibrage de charge. Nous avons aussi effectué les simulations avec l'équilibrage de charge mais en utilisant un seuil d'équilibrage δ=10%. Dans les figures 4.30 et 4.31 suivantes nous présentons le délai d'accès au médium global sur tout le réseau sans fils pour chacune des configurations respectivement à cause de la saturation des buffers et du dépassement du seuil de retransmission.

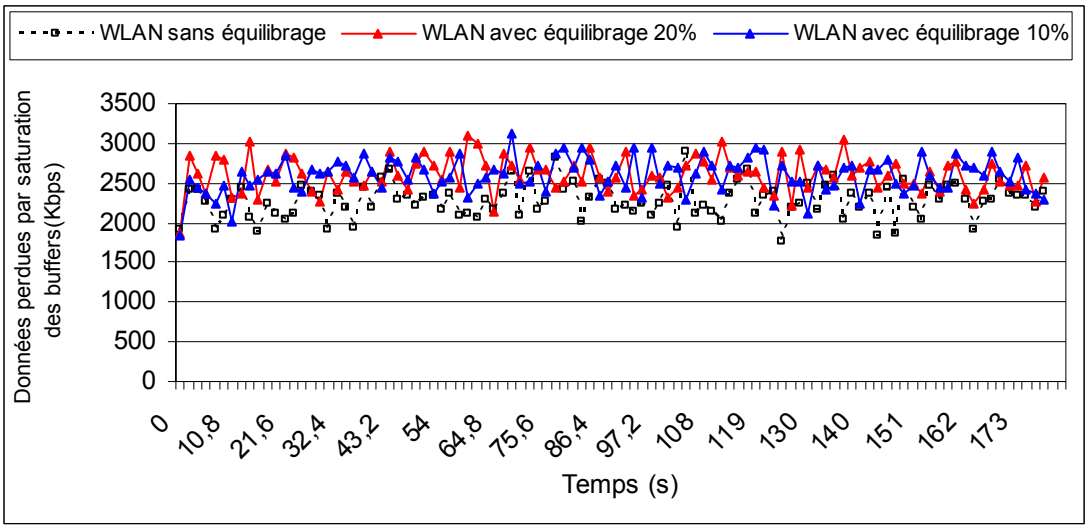

Fig. 4.30 Données perdues par saturation des buffers

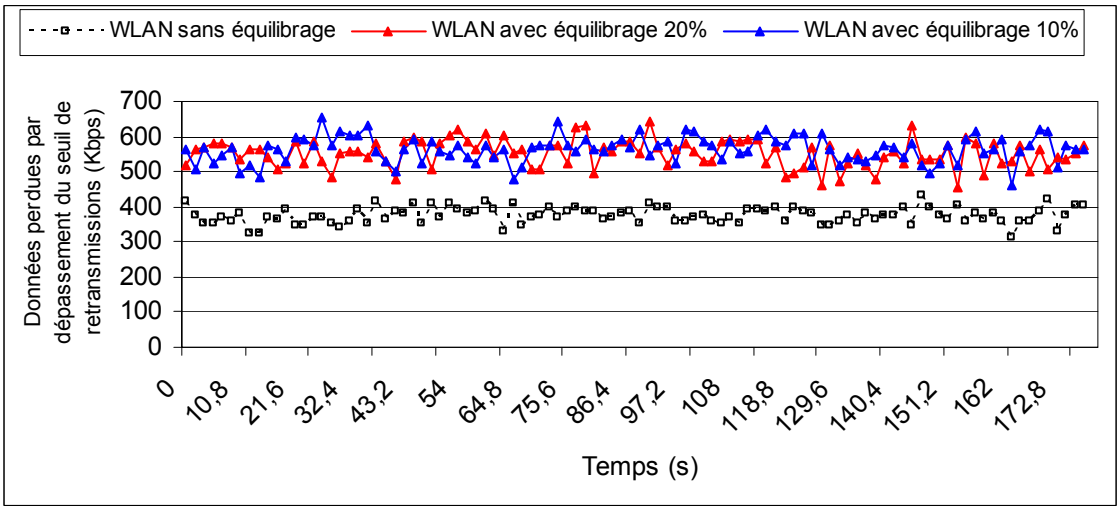

Fig. 4.31 Données perdues par dépassement du seuil de retransmissions

Par rapport aux résultats présentés dans l'exemple du sous paragraphe précédent, nous remarquons que l'ordre de grandeur des pertes a considérablement augmenté. Ceci est explicable par l'augmentation du nombre de stations en compétition à l'accès au médium. La présence de plus de stations dans les zones de couverture commune cause une augmentation du bruit et donc une dégradation du rapport SNR pour chacune des stations.

Nous remarquons que le recours à notre approche d'équilibrage a causé l'augmentation des pertes de données. Avec un seuil d'équilibrage de 10% les pertes sont en moyenne très légèrement inférieures par rapport à un seuil de 20%. Le recours à l'équilibrage a engendré un délai d'accès au médium global plus élevé (Figure 4.32). La moyenne de ce délai est légèrement plus faible dans le cas d'un seuil de 10% que dans un seuil de 20%.

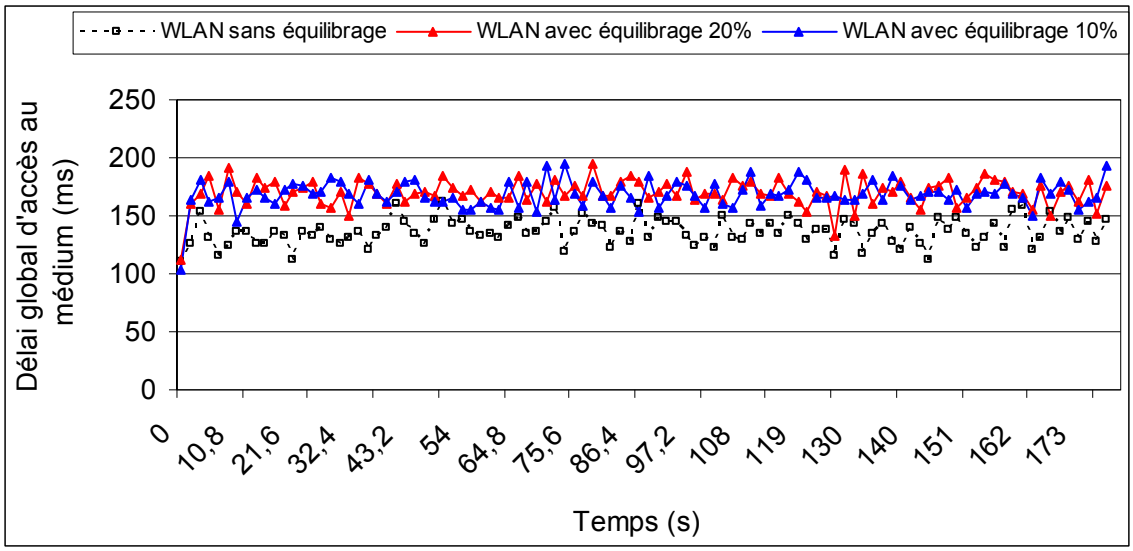

Fig. 4.32 Délai global d'accès au médium

Nous allons maintenant évaluer le comportement de quelques stations du réseau lors de l'application de l'équilibrage. Pour la station M16_Vidéo qui viens d'entrer dans l'espace du réseau sans fils, nous voyons sur la figure 4.33, que l'approche d'équilibrage améliorée a réduit considérablement le délai d'accès au médium de la station. A δ=10%, l'équilibrage donne des performances comparables à celui avec δ=20%. Par contre à 10%, la variation de ce délai est plus faible.

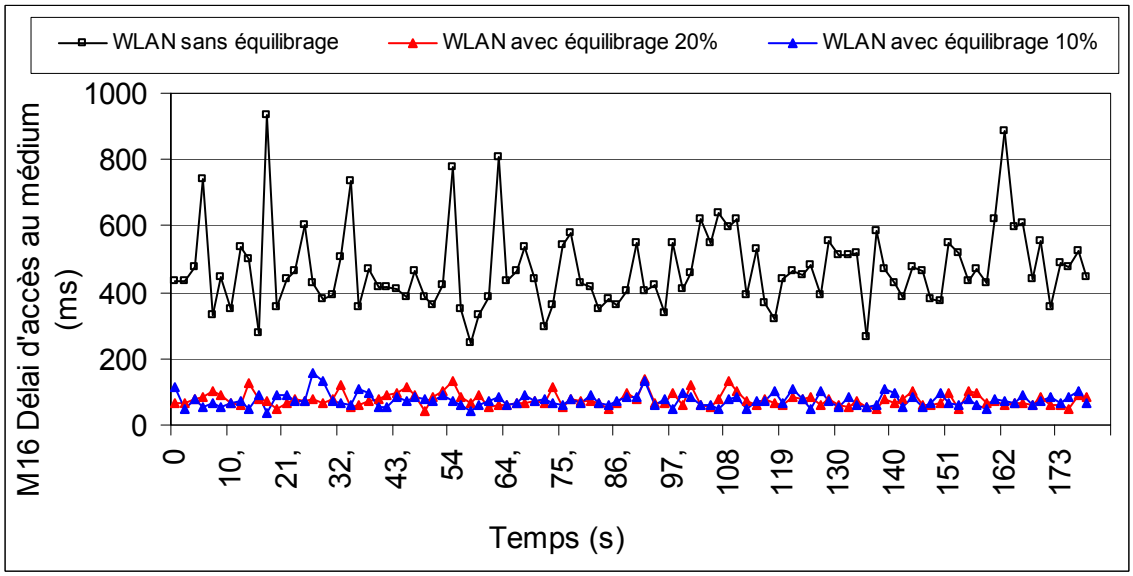

Fig. 4.33 Délai d'accès au médium de la station M16_Vi

Pour cette station, nous avons aussi reporté dans la figure 4.34, le nombre de slots de Backoff lors de l'accès au médium. On remarque que le nombre de slots de backoff pour l'accès au médium a été réduit par l'application l'équilibrage. Ce qui explique la baisse du temps d'accès au médium.

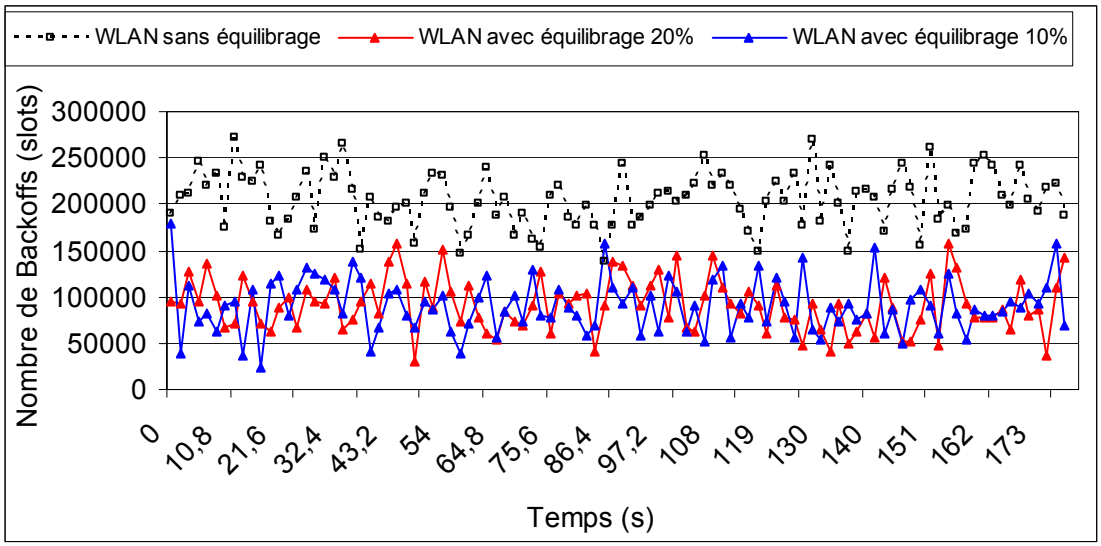

Fig. 4.34 Nombre de slots de Backoff de M16_Vidéo

Dans les figures 4.35 et 4.36, nous présentons le taux de perte de données respectivement dues à la saturation des buffers et au dépassement du seuil de retransmission.

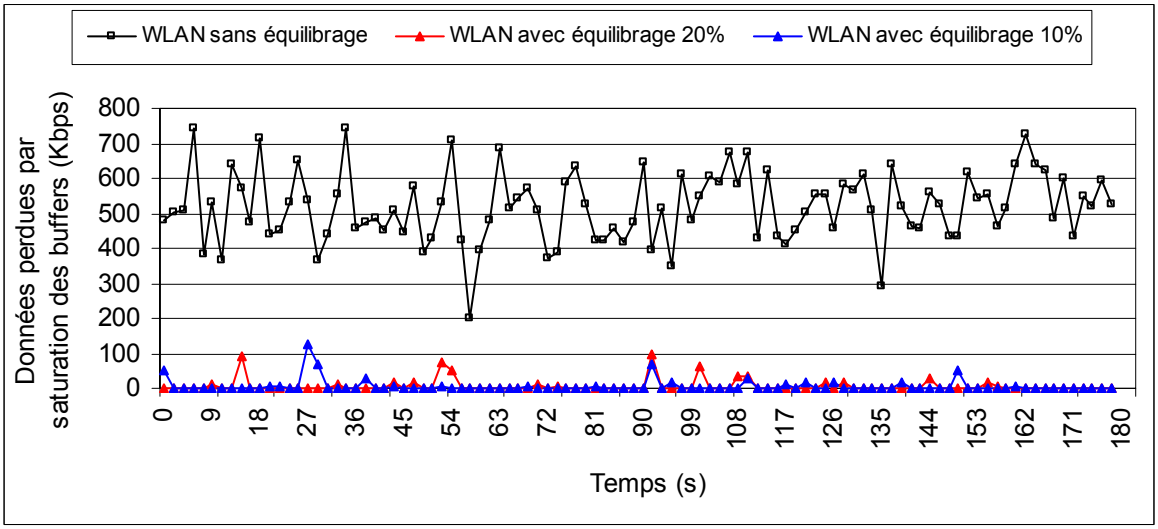

Fig. 4.35 Données perdues par saturation des buffers (M16)

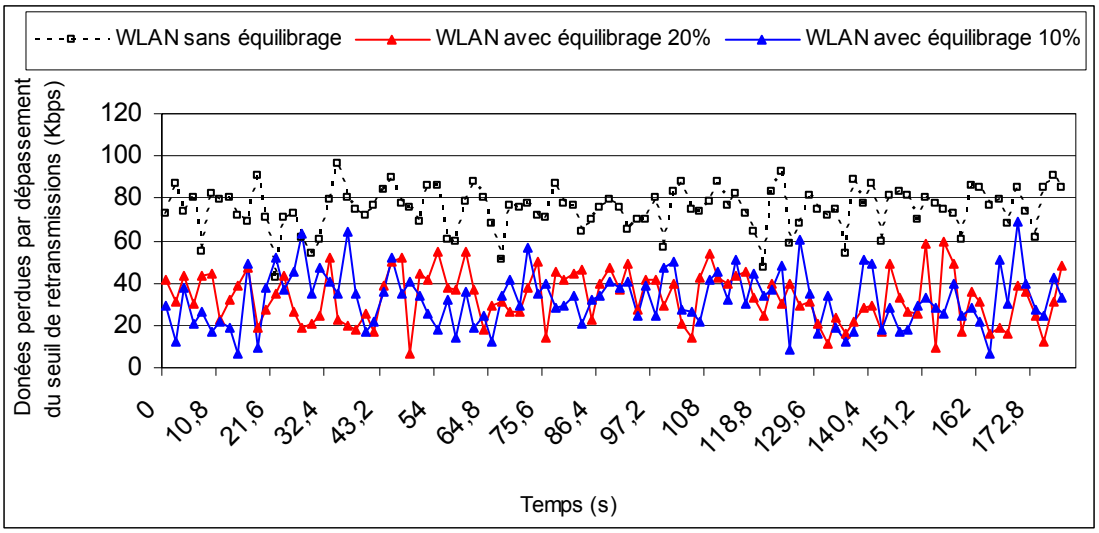

Fig. 4.36 Données perdues par dépassement du seuil de retransmissions (M16)

Nous remarquons que le taux de perte global est inacceptable en utilisant uniquement les recommandations du standard IEEE 802.11 : le taux de perte dépasse 50%. Avec l'application de l'approche d'équilibrage, nous constatons une réduction importante du taux de perte qui avoisine alors 5% en moyenne. Les résultats sont comparables pour des seuils d'équilibrage de 10% et 20%.

La figure 4.37 représente le délai d'accès au médium de la station M13_Vi. Cette station aurait dû être réassociée si notre algorithme d'équilibrage de charge initial avait été appliqué. Notre algorithme amélioré interdit le déplacement de stations supportant des flux vidéo, M13 reste donc toujours associé à AP2. La figure 4.37 montre que le délai d'accès au médium a été réduit pour cette station tout en évitant la procédure de réassociation.

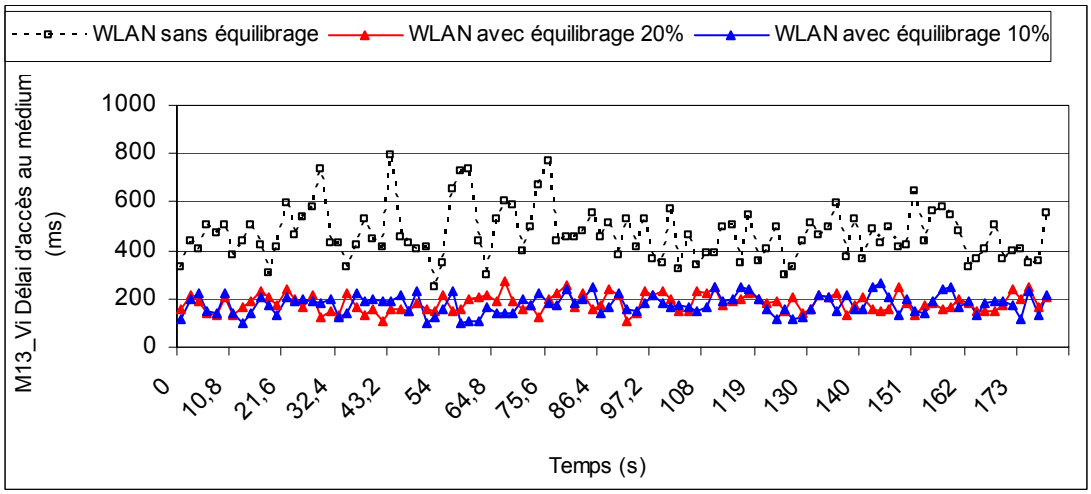

Fig. 4.37 Délai d'accès au médium M13

Dans les deux figures suivantes, nous représentons le taux de perte de données par cause de saturation des buffers et par dépassement du seuil de retransmission.

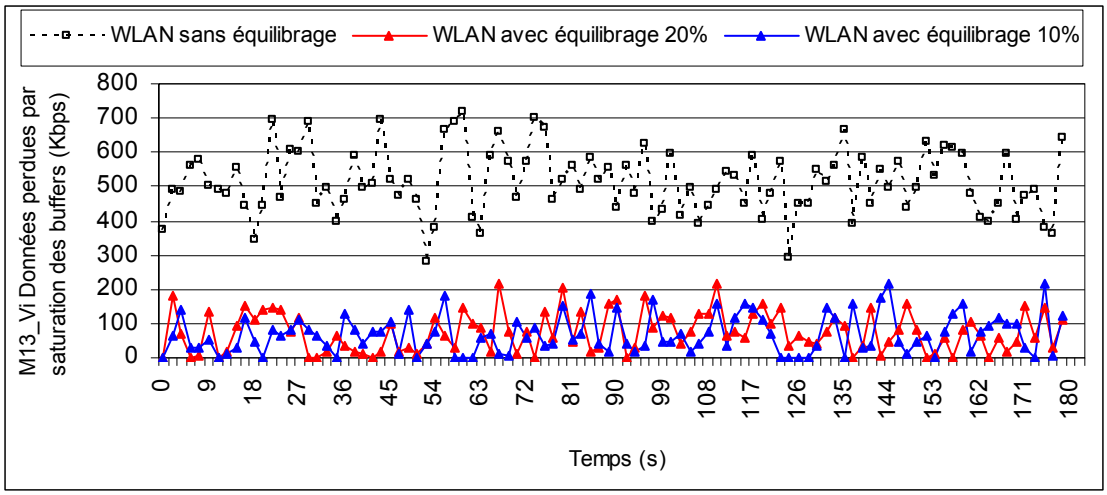

Fig. 4.38 Données perdues par saturation des buffers M13_Vidéo

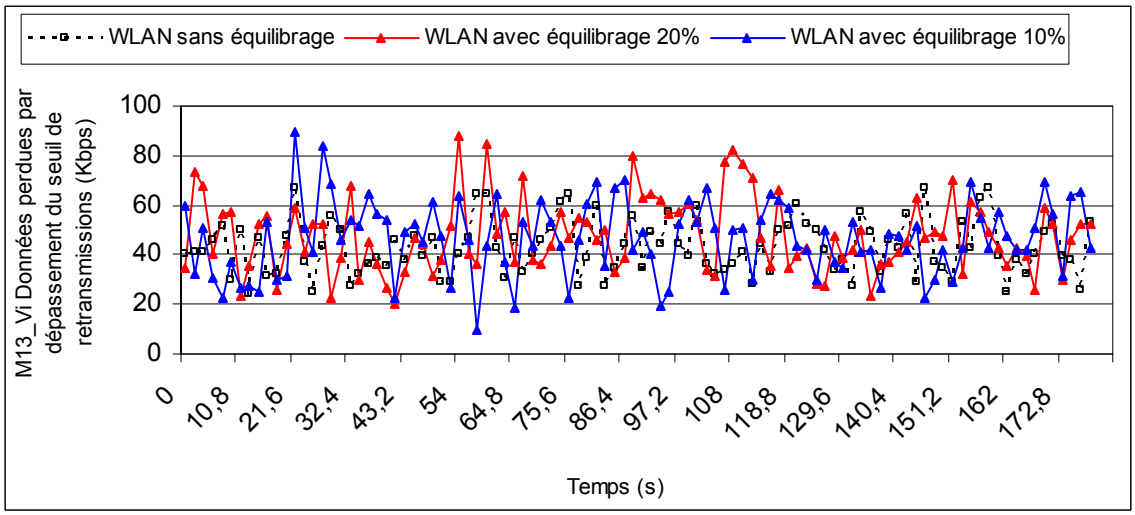

Fig. 4.39 Données perdues par dépassement du seuil de retransmissions M13_Vidéo

D'après ces deux figures, nous constatons une réduction importante du taux de perte de données global quand l'approche d'équilibrage de charge améliorée est utilisée.

Dans la figure 4.40 nous reportons le délai d'accès au médium au niveau de la station M8_Vi associée à AP3. Nous remarquons que l'algorithme d'équilibrage de charge et notamment la réassociation de M11 à AP3 a causé une augmentation du délai d'accès de M8_Vi. Mais nous remarquons aussi que cette augmentation est légère et reste acceptable pour l'application vidéo.

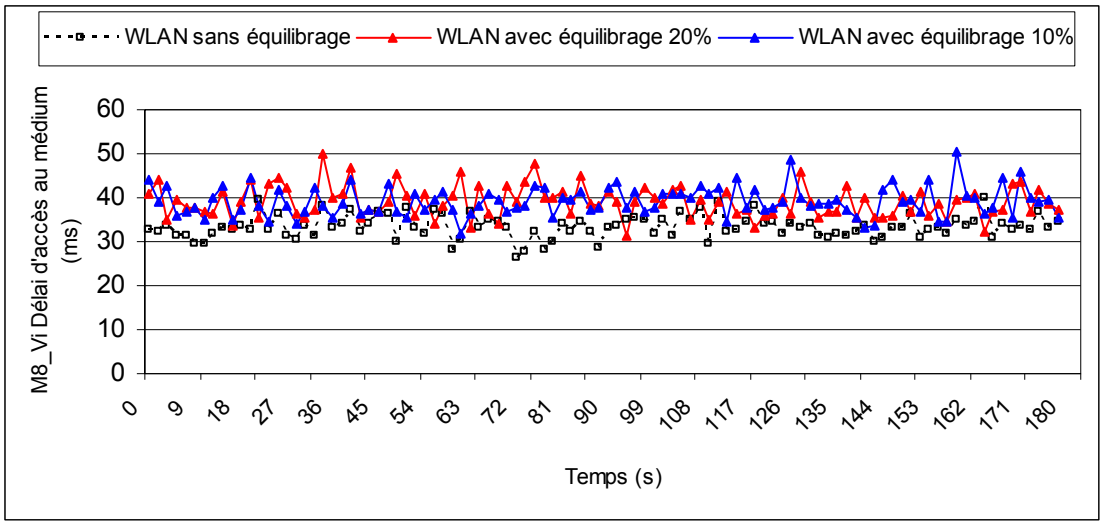

Fig. 4.40 Délai d'accès au médium M8_Vidéo

4. Synthèse des résultats

D'après les simulations sur les deux scénarios présentés dans le paragraphe précédent, nous constatons une amélioration des performances globales du réseau sans fils quand notre approche d'équilibrage de charge est appliquée. Nous constatons aussi que les performances locales, au niveau des stations sans fils sont améliorées. Ceci est évident pour la nouvelle station entrant dans le réseau ou encore pour les stations qui étaient associées au point d'accès surchargé. Des améliorations sont aussi apportées aux autres stations mais une troisième catégorie de stations présente une dégradation de performances. Ceci concerne surtout les stations qui étaient associées à des points d'accès moins chargés pour lesquelles de nouvelles stations ont été réassociées. Nous expliquons cela par une augmentation du nombre de stations en compétition vers le canal dans la cellule ce qui augmente entre autre le temps d'accès au médium. Cependant, dans la plupart des cas, cette dégradation de performances reste acceptable quand il s'agit par exemple du taux de perte binaire ou du temps d'accès au médium.

En comparant les performances globales sur les deux exemples présentés dans le paragraphe précédent, on montre que l'approche d'équilibrage ne fonctionne pas bien quand le réseau est plus chargé. Ceci est dû au nombre plus important de stations dans le réseau et à la charge globale induite sur l'ensemble des points d'accès. Dans le deuxième scénario, la charge moyenne des points d'accès est de 3770 Kbps et la charge maximale est de 4520 Kbps (δ=20%), ce qui veut dire qu'on s'approche déjà de la charge maximale réelle du 802.11.

Nous ne remarquons pas une nette amélioration des performances par notre approche d'équilibrage quand on passe d'un taux d'équilibrage de 20% à un taux d'équilibrage de 10%. Nous voyons qu'il sera possible de faire des tests pour déterminer la valeur optimale du taux d'équilibrage. La valeur de ce paramètre dépendra de la taille du trafic de l'ensemble des applications du réseau mais aussi de la charge du réseau public (nombre de points d'accès et nombre de clients possibles). La considération d'un taux d'équilibrage moins faible conduira par contre à une augmentation possible du temps de convergence de l'algorithme d'équilibrage.

Nous remarquons aussi que les résultats de notre approche d'équilibrage ne sont pas aussi bons pour les stations qui sont exposées à des flux de paquets des autres stations. Nous considérons que ceci est dû à l'augmentation du bruit lors de la réception et donc une dégradation du rapport signal sur bruit.

5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons utilisé l'outil de simulation OPNET Modeler pour comparer les performances en termes de qualité de service de notre approche d'équilibrage par rapport au standard IEEE 802.11. L'analyse des résultats obtenus montre une meilleure performance globale du réseau public sans fils par l'utilisation de l'approche d'équilibrage de charge que nous avons élaborée. Nous remarquons aussi une amélioration de la qualité de service offerte à la plupart des utilisateurs sans fils, par exemple en termes de taux de perte de paquets. Quelques unes des stations voient leurs paramètres se dégrader, mais les valeurs de ces paramètres restent toujours convenables par rapport à la qualité de service minimale requise par les applications.

Dans ce chapitre, nous avons aussi testé quelques améliorations de l'approche d'équilibrage et effectué des comparaisons par rapport à des techniques introduites par le comité du standard, tel que l'échange de paquets RTS/CTS.

Cependant, quelques résultats de simulation nous incitent à penser à l'influence de la variation du rapport Signal sur Bruit sur l'amélioration de la qualité de service pour les stations qui sont réassociés lors de l'équilibrage mais aussi pour le reste des stations du réseau. Nous pensons qu'il ne suffit plus de rester au dessus du seuil de puissance de réception minimal, tel que c'est défini dans le standard, pour garantir des performances meilleures lors de l'application de l'équilibrage mais qu'il faut aussi considérer la variation du rapport signal sur bruit offert à chacune des stations. Nous proposons de définir une nouvelle fonction d'équilibrage globale dont l'objectif est de maximiser la variation du rapport SNR pour l'ensemble des stations tout en réduisant l'écart de charge entre les différents points d'accès. Cette fonction se présente alors sous la forme suivante :

$$f = \alpha \times \left(\sum_{i=1}^{m} SNR_i \right) + \gamma \times \frac{2}{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \left| CAP_j - CAP_i \right|}$$

- M est le nombre des stations mobiles du réseau.

- SNR_i est le rapport signal sur bruit d'une station i par rapport au point d'accès auquel elle est associée.

- N est le nombre total de points d'accès du réseau.

- CAP_i est la charge d'un point d'accès AP_i.

- α et γ sont des facteurs de paramétrage et de mise à l'échelle.

La difficulté majeure pour la simulation d'une telle fonction est de pouvoir estimer la variation du rapport SNR pour l'ensemble des stations sans fils lors de la réassociation de quelques stations avec et sans équilibrage (avant de décider de la solution équilibrée, il faut estimer le rapport SNR de toutes les stations pour toutes les solutions d'équilibrage possibles). On peut aussi définir des fonctions spécifiques au niveau des stations avec des applications critiques qui contrôlent la variation du rapport SNR de ces stations lors de l'application de l'équilibrage.

Références

Breaslu, L., K. Estrin, D. Fall, S. Floyd, J. Heidemann, A. Helmy, P. Huang, S. McCanne, K. Varadhan, X. Ya, et H. Yu (2000). Advances in network simulation. IEEE Computer, Vol. 33, N°. 5, pp. 59-67.

Jabri, I., N. Krommenacker, T. Divoux et A. Soudani (2008). IEEE 802.11 Load balancing : an approach for QoS Enhancement. International Journal of Wireless Information Networks, Vol. 15, N°. 1, pp. 16-30.

Lucio, G.F., M. Paredes-Farrera, E. Jammeh, M. Fleury et M. J. Reed (2003). OPNET Modeler and NS-2 : Comparing the accuracy of network simulators for packet-level analysis using a network tesbed. WSEAS Transactions on Computers, Vol. 2, N°. 3

Na, C., J.K. Chen et T.S. Rappaport (2006). Measured traffic statistics and throughput of IEEE 802.11b public WLAN hotspots with three different applications. IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 5, N°. 11, pp. 3296-3305.

NS (2007). www.isi.edu/nsnam/ns/

OPNET Technologies. The OPNET Modeler (2007). www.opnet.com/products/modeler

Pawlikowski, K., H.D. Joshua Jeong et J. S. Ruth Lee (2002). On credibility of simulation studies of telecommunication networks. IEEE Communications Magazine, Vol. 40, N°. 1, pp. 132-139.

Yong, X., H. Qingyan, W. Jibo et Z. Haitao (2007). Rate adaptive protocol for multirate IEEE 802.11 networks. Journal of Electronics (China), Vol. 24, N°. 3, pp. 289-295.

Wu, D. et R. NEGI (2006). Effective Capacity-Based qualiy of service measures for wireless networks. Mobile Networks and Applications, Vol. 11, pp. 91-99, 2006.

Conclusions et perspectives

Dans les travaux abordés dans cette thèse, nous avons traité la problématique de la qualité de service dans les réseaux sans fils IEEE 802.11. Ces réseaux sont de plus en plus utilisés dans les lieux publics tels que les gares, les aéroports, les centres commerciaux, les campus universitaires, etc, et permettent ainsi aux utilisateurs de communiquer ensemble et d'accéder au réseau Internet. Une multitude d'applications de plus en plus exigeantes en terme de qualité de service, sont entreprises par ces utilisateurs. La méthode d'accès de base adoptée par la norme 802.11 ne permet pas de garantir un minimum de qualité de service pour chaque application. Ainsi, dans le premier chapitre, nous avons discuté la problématique de la qualité de service dans l'ensemble des technologies sans fils. Nous avons ensuite présenté les différentes solutions pour le support de qualité de service particulièrement pour la norme 802.11. Ces solutions, s'articulant sur les paramètres d'accès au médium et les techniques d'ordonnancement, sont en général incompatibles entre elles et avec la norme. Outre leurs difficultés d'implémentation, certaines solutions restent spécifiques à des conditions particulières.

Au travers l'état de l'art des mécanismes de gestion de la qualité de service dans les réseaux sans fils IEEE 802.11, nous avons pu constater de nombreuses limitations, surtout en ce qui concerne les paramètres pris en compte dans les approches basées sur l'équilibrage de charge. C'est pourquoi, nous avons proposé une nouvelle solution d'équilibrage qui considère la bande passante demandée par chaque utilisateur en plus du rapport signal sur bruit, pour décider de l'association des stations à un point d'accès. L'architecture de cette solution et l'algorithme élaboré pour sa mise en place ont été détaillés dans le deuxième chapitre.

L'implantation de la solution d'équilibrage proposée nécessite l'utilisation d'échanges entre les différentes entités de l'architecture. Ceci a été présenté dans le chapitre 3. Les applications

doivent avoir la possibilité d'exprimer leurs besoins en termes de qualité de service. Les points d'accès doivent s'échanger des informations sur leurs états de charges avec le serveur d'équilibrage de charge : l'entité qui exécute l'algorithme d'équilibrage et décide de l'association des stations sans fils. Dans un objectif de rester compatible avec la norme 802.11, nous avons proposé de nouvelles trames respectant les formats génériques proposés par la norme. Les nouveaux échanges établis ont été vérifiés et testés par les outils SDL et MSC. Les résultats obtenus montrent un déroulement séquentiel et sans blocage de l'ensemble des échanges.

Pour valider les performances de notre approche et son efficacité en termes de support de qualité de services par rapport au standard IEEE 802.11, nous avons choisi de procéder par simulation en utilisant l'outil OPNET. Les résultats obtenus à l'issue d'une panoplie de scénarios et de tests, montrent que l'approche proposée permet d'améliorer les performances globales du réseau sans fils en optimisant la répartition de la bande passante disponible sur l'ensemble des utilisateurs. Les paramètres de qualité de service des différentes applications tels que le taux de perte des paquets ou le temps d'accès au médium, sont nettement améliorés pour la plupart des de stations même s'ils sont faiblement réduits pour d'autres.

L'étude menée tout au long de cette thèse ainsi que les résultats obtenus permettent de dégager plusieurs perspectives de recherche.

Pour la validation de notre approche d'équilibrage de charge nous avons utilisé l'outil de simulation OPNET. Dans cet outil, il n'y a pas encore un modèle complet qui représente la norme 802.11e, définie pour améliorer le support de la qualité de service au standard. L'élaboration d'un tel modèle nous permettra de comparer rigoureusement cette solution du standard à celle que nous avons proposé mais aussi de tester cette approche conjointement avec la norme 802.11e. Les modèles analytiques de la norme 802.11e abondants dans les travaux de recherche actuels, cette comparaison peut être aussi assurée par l'élaboration d'un modèle analytique du fonctionnement de la couche MAC ainsi modifiée par notre approche d'équilibrage.

Dans ce cadre, il sera aussi intéressant de pouvoir tester notre approche sur une plate forme réelle de réseaux 802.11. Plusieurs difficultés techniques telles que l'accès aux pilotes des cartes et points d'accès 802.11 sont à surmonter. Par exemple, il faut avoir la possibilité d'intervenir sur les pilotes de ces interfaces au niveau MAC pour insérer les nouvelles procédures mais aussi au niveau physique pour pouvoir forcer l'association d'une station à un point d'accès n'offrant pas forcement le meilleur rapport signal sur bruit. Dans un réseau sans

fils, il faudra aussi trouver les moyens et les outils nécessaires pour mesurer avec une faible marge d'erreurs la bande passante à chaque fois disponible et les paramètres de QoS des utilisateurs.

L'analyse des résultats obtenus lors de la comparaison des performances en termes de QoS de notre approche d'équilibrage de charge par rapport au standard, a montré que les prises de décision d'association des stations 802.11 aux points d'accès doit prendre en considération la bande passante demandée, la bande passante disponible et la variation du rapport signal sur bruit perçue. Dans ce sens, une nouvelle fonction de distribution des stations sans fils a été proposée. L'une des perspectives de ce travail, sera de tester la nouvelle fonction proposée et de vérifier si elle apporte une meilleure amélioration de la qualité de service dans le réseau sans fils.

D'autres paramètres de qualité de service comme le taux de perte, les délais de bout en bout et la gigue peuvent aussi être pris en compte dans l'approche d'équilibrage. L'algorithme d'équilibrage que nous avons élaboré ne considère que la bande passante demandée par chaque utilisateur comme paramètre de qualité en plus du rapport signal sur bruit. Dans le futur, nous travaillerons sur l'insertion des autres paramètres de QoS supplémentaires dans l'équilibrage. La fonction d'équilibrage sera alors une fonction multi-objectifs considérant l'ensemble des paramètres de QoS demandés par les applications. Nous pourrions alors vérifier si la considération de ces paramètres apporte une amélioration supplémentaire de l'approche d'équilibrage.

Format des trames 802.11

Format générique d'une trame MAC 802.11

Le format général d'une trame MAC 802.11 est présenté par la figure suivante :

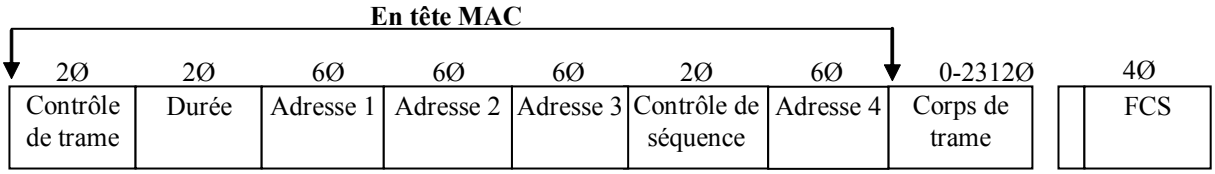

Fig. A.1 Format général d'une trame MAC 802.11

Le format générique d'une trame de gestion MAC 802.11 se présente comme suit :

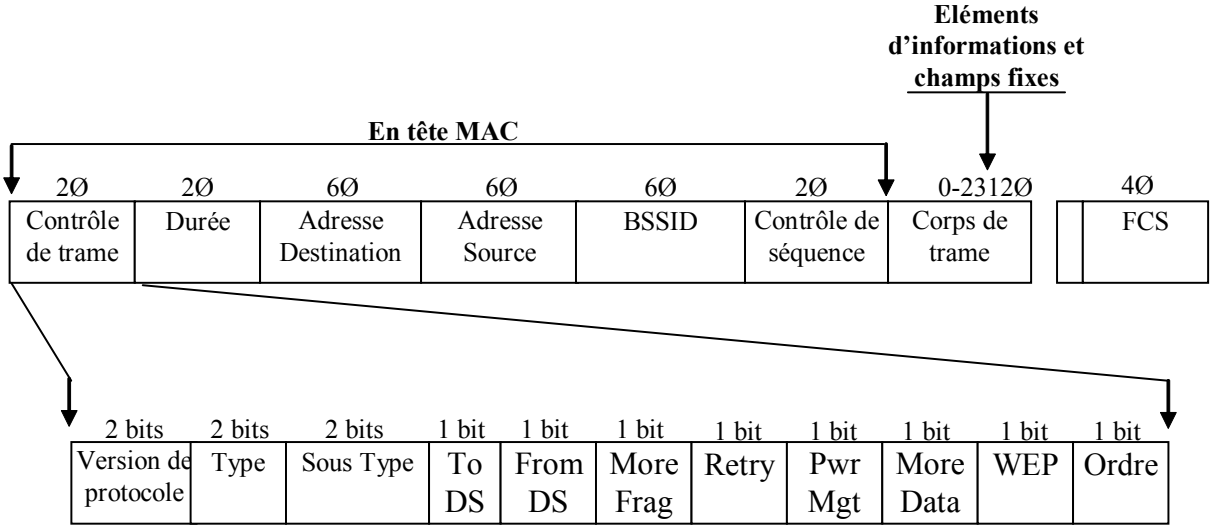

Fig. A.2 Format générique d'une trame de gestion MAC 802.11

Le tableau suivant représente la signification des différentes valeurs des champs Type et Sous Type.

Tableau A 1 Signification des champs Type et Sous Type

Type	Nature de la trame	Sous Type	Nature du sous type
00	Gestion	0000	Requête d'association
00	Gestion	0001	Réponse à une requête d'association
00	Gestion	0010	Requête de réassociation
00	Gestion	0011	Réponse à une requête de réassociation
00	Gestion	0100	Requête d'interrogation (Probe request)
00	Gestion	0101	Réponse d'interrogation (Probe response)
00	**Gestion**	**0110**	**Non utilisé**
00	**Gestion**	**0111**	**Non utilisé**
00	Gestion	1000	Trame balise

00	**Gestion**	**1001**	**Non utilisé**
00	Gestion	1010	Désassociation
00	Gestion	1011	Authentification
00	Gestion	1100	Désauthentification
00	Gestion	1101	Requête de connexion
00	Gestion	1110	Acceptation de la connexion
00	Gestion	1111	Fin de la connexion
01	**Contrôle**	**0000--1001**	**Non utilisés**
01	Contrôle	1010	PS-Poll
01	Contrôle	1011	RTS
01	Contrôle	1100	CTS
01	Contrôle	1101	ACK
01	Contrôle	1110	CF-End
01	Contrôle	1111	CF-End + CF-ACK
10	Données	0000	Données
10	Données	0001	Données + CF-ACK
10	Données	0010	Données + CF-Poll
10	Données	0011	Données + CF-ACK + CF-Poll
10	Données	0100	Null Function (pas de données)
10	Données	0101	CF-ACK (pas de données)
10	Données	0110	CF-Poll (pas de données)
10	Données	0111	CF-ACK + CF-Poll (pas de données)
10	**Données**	**1000-1111**	**Non utilisés**
10	**Non utilisé**	**0000-1111**	**Non utilisés**

Codes de Raison

Dans une trame de gestion, on peut avoir plusieurs champs *élément d'information* de longueurs fixes. Parmi ces champs, on peut trouver « le code raison ». Ce code est destiné à préciser les raisons de l'envoi non sollicité d'une trame de désassociation ou de désauthentification. Cette raison est codée sur 2 octets. Le tableau suivant présente la signification des différentes valeurs.

Tableau A 2 Codes de raison

Code	**Explication**
0	Réservé, non utilisé
1	Non spécifié
2	La pré-authentification n'est pas valide
3	La station a quitté le BSS ou l'ESS et est désauthentifiée
4	Le temporisateur d'inactivité a expiré et la station est désassociée
5	Désassociée à cause de l'insuffisance des ressources au niveau du point d'accès
6	Type ou Sous type de trame incorrecte reçue de la part d'une station non authentifiée
7	Type ou Sous type de trame incorrecte reçue de la part d'une station non associée
8	La station a quitté le BSS ou l'ESS et est désassociée
9	Association ou réassociation demandée avant la fin de l'authentification
10-65535	Réservés, non utilisés

Codes d'état

Un code d'état indique le succès ou l'échec d'une opération. Ce code qui s'écrit sur deux octets indique que l'opération est réussie quant sa valeur est 0. Les autres valeurs présentées dans le tableau suivant montrent les différentes raison d'échec.

Tableau A 3 La signification des codes d'état

Code d'état	signification
0	Succès
1	Echec indéterminé
2-9	Réservé
10	Ne peut supporter les fonctionnalités annoncées dans le champ des fonctions supportées
11	Réassociation refusée du fait de l'impossibilité de confirmer l'association
12	Association refusée due à une raison non spécifiée
13	La station ne supporte pas l'algorithme d'authentification spécifié
14	Trame d'authentification avec un numéro de séquence non conforme à ce qui est attendu
15	Authentification rejetée par cause d'échec suite à la soumission du texte de challenge
16	Authentification rejetée par cause de timeout de la trame attendue
17	Association rejetée parce que le point d'accès ne peut supporter une station supplémentaire
18	Association rejetée parce que la station ne supporte pas toutes les vitesses de transmission du BSS
19-65535	Non utilisés

Eléments d'information de longueurs variables

Le format général d'un élément d'information comporte comme 1er champ sur 1 octet l'identificateur de l'élément. Le 2ème champ contient sur 1 octet la longueur en octets du dernier champ de l'information proprement dite. Le tableau suivant présente les composants d'information correspondant aux différents identificateurs.

Tableau A 4 Identificateurs des différents éléments d'information

Identificateur	Composant
0	SSID
1	Vitesses de transmission supportées
2	Ensemble de fréquences FH
3	Ensemble de fréquences DS
4	Paramètres CF
5	TIM
6	Paramètres IBSS
7-15	Non utilisés
16	Texte d'authentification
17-31	Réservé pour extension d'authentification
32-255	Réservés – Non utilisés

Glossaire

ACK	Acknowledgement
ACL	Asynchronous Connection Less
ACS	Admission Control Server
AID	Association Identity
AIFS	Arbitration IFS
AIFSN	Arbitration IFS Number
AP	Access Point
ARCEP	Autorité de Régulation des Communications Electroniques et des Postes
ARP	Adress Resolution Protocol
ARQ	Automatic Repeat reQuest
ATM	Asynchronous Transfer Mode
BE	Best Effort
BK	Background
BSS	Basic Service Set
CAPWAP	Control and Provisioning of Wireless Access Points
CFP	Contention Free Period
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access/ Collision Avoidance
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access/ Collision Detection
CP	Contention Period
CTS	Clear To Send
CW	Contention Window
DCF	Distributed Coordination Function
DFS	Distributed Fair Scheduling
DIFS	DCF IFS
DLBA	Dynamic Load Balance Algorithm
DLP	Direct Link Protocol
DS	Distribution System
DS-EDCA	Differentiated Service-EDCA
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
EDCA	Enhanced Distributed Channel Access
EFSM	Extended Finite State Machines
ESS	Extended Service Set
ESTELLE	Extended State Transition Language
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
EY-NPMA	Elimination Yield-Non Preemptive Multiple Access
FCS	Frame Check Sequence
FEC	Forward Error Correction
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
GSM	Global System for Mobile communications
GTS	Guaranteed Time Slots
HC	Hybrid Coordinator
HCF	Hybrid Coordination Function
HCCA	HCF Controled Channel Access
HTTP	Hyper Text Transfer Protocol

IAPP	Inter Access Point Protocol
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IETF	Internet Engineering Task Force
IFS	Inter Frame Space
IP	Internet Protcol
ISM	Industrial, Scientific and Medical
ISO/IEC	International Organisation for Standardization/ International Electrotechnical Comission
ITU-T	International Telecommunication Union/ Telecommunication standardization sector
LBA	Load Balancing Agent
LLC	Logical Link Control
LOTOS	Language of Temporal Ordering Specification
LWAPP	Lightweight Access Point Protocol
MAC	Medium Access Control
MPDU	MAC Protocol Data Unit
MSC	Message Sequence Chart
MSDU	MAC Service Data Unit
NAV	Network Allocation Vector
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OPNET	Optimized Network Engineering Tools
OSI	Open System Interconnexion
PCF	Point Coordination Function
PDA	Personal Digital Assistant
PF	Persistance Factor
PIFS	PCF IFS
PSM	Power Save Mode
QAP	QoS Access Point
QBSS	QoS BSS
QoS	Quality Of Service
QSTA	QoS Station
RSSI	Received Signal Strength Indication
RTS	Request To Send
SDL	Specification and Descripton Language
SCO	Synchronous Connection Oriented
SCFQ	Self-Clocked Fair Queuing
SIFS	Short SIFS
SIG	Special Interest Group
SNMP	Simple Network Management Protocol
SNR	Signal by Noise Ratio
SLA	Service Level Agreement
SLS	Service Level Specification
TBTT	Target Beacon Transmission Time
TCP	Transmission Control Protocol
TDMA	Time division Multiple Access
TXOP	Transmission Opportunity
UDP	User Datagram Protocol
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
VI	Video

VMAC	Virtual MAC
VO	Voice
VoIP	Voice Over IP
VS	Virtual Source
WEP	Wired Equivalent Privacy
WFQ	Weighted Fair Queuing
WiFi	Wireless Fidelity
WM	Wireless Manager
WPAN	Wireless Personal Area Network

Liste des publications

Revues internationales avec comité de lecture

I. Jabri, A. Soudani, N. Krommenacker, T. Divoux et S. Nasri. QoS protocol specification for IEEE 802.11 WLAN. Information Technology Journal, Vol. 7, N°. 4, pp. 549-559, Asian Network for Scientific Information, 2008.

I. Jabri, N. Krommenacker, T. Divoux et A. Soudani. IEEE 802.11 load balancing: an approach for QoS enhancement. International Journal of Wireless Information Networks, Springer, Vol. 15, N°. 1, pp. 16-30.

Chapitres d'ouvrages

I. Jabri, N. Krommenacker, A. Soudani et T. Divoux. Load balancing approach for wireless IEEE 802.11 QoS enhancement. Personal Wireless Communications "PWC'06", Springer, Lecture Notes in Computer Science, ISBN 978-3-540-45174-7, pp 88-99, 2006.

Conférences internationales avec comités de lecture

I. Jabri, A. Soudani, N. Krommenacker, T. Divoux et S. Nasri. Gestion de la qualité de service et équilibrage de charges dans les réseaux sans fils IEEE 802.11. Conférence Internationale « Sciences of Electronics, Technologies of Information and Telecommunication » SETIT, Hammamet, 25-29 Mars 2007

I. Jabri, A. Soudani, N. Krommenacker, T. Divoux. A Proposal Approach for Load Distribution and Resources Sharing in IEEE 802.11 Networks. International Conference on Wireless and Mobile Communications, ICWMC'06, July 29-31, 2006, Bucharest, Romania, Roumanie (2006).

I. Jabri et S. Nasri. Etude des protocoles réactifs et proactifs pour le routage dynamique dans les réseaux ad hoc. CIFA, Conférence Internationale Francophone d'Automatique. Douz, Tunisie, 22-24 Novembre 2004.

I. Jabri, A. Helali, J. Bhar et S. Nasri. Protocoles de routage réactifs et proactifs dans les réseaux ad hoc : vers une topologie dynamique. Actes de SCS'2004, Premier Congrès International IEEE de Signaux, Circuits et Systèmes. Monastir, Tunisie, 18-21 Mars 2004.

A. Helali, I. Jabri, J. Bhar, M. Bettaieb et S. Nasri. Evaluation de performances d'Ethernet commuté pour des applications industrielles. Actes de SCS'2004, Premier Congrès International IEEE de Signaux, Circuits et Systèmes. Monastir, Tunisie, 18-21 Mars 2004.

I. Jabri et S. Nasri. Une approche d'étude de la dynamique d'un réseau ad hoc avec routage réactif ou proactif. Actes du 10^{e} Colloque Francophone sur l'Ingénierie des Protocoles. Paris, France, 7-10 Octobre 2003, pages 269-284. Hermes Science Publications (ISBN 2-7462-0798-2).