

Thèse de Doctorat
Université Pierre et Marie Curie – Paris 6

Spécialité

SYSTÈMES INFORMATIQUES

présentée par

M. Cédric GUEGUEN

pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université Pierre et Marie Curie – Paris 6

**Allocation de ressources
dans les réseaux sans fil
à large bande multi-porteuses**

Jury

Isabelle Guérin Lassous	Rapporteur	Professeur à l'Université Claude Bernard – Lyon I
Thierry Turletti	Rapporteur	Chercheur à l'INRIA Sophia Antipolis
André-Luc Beylot	Examinateur	Professeur à l'INPT/ENSEEIHT – Toulouse
Sébastien Tixeuil	Examinateur	Professeur à l'Université Pierre et Marie Curie
Serge Fdida	Directeur de thèse	Professeur à l'Université Pierre et Marie Curie
Sébastien Baey	Encadrant	Maître de Conférences à l'Université Pierre et Marie Curie

Numéro bibliothèque : _____

Thèse de Doctorat
Université Pierre et Marie Curie – Paris 6

Spécialité

SYSTÈMES INFORMATIQUES

présentée par

M. Cédric GUEGUEN

pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université Pierre et Marie Curie – Paris 6

**Allocation de ressources
dans les réseaux sans fil
à large bande multi-porteuses**

Jury

Isabelle Guérin Lassous	Rapporteur	Professeur à l'Université Claude Bernard – Lyon I
Thierry Turletti	Rapporteur	Chercheur à l'INRIA Sophia Antipolis
André-Luc Beylot	Examinateur	Professeur à l'INPT/ENSEEIHT – Toulouse
Sébastien Tixeuil	Examinateur	Professeur à l'Université Pierre et Marie Curie
Serge Fdida	Directeur de thèse	Professeur à l'Université Pierre et Marie Curie
Sébastien Baey	Encadrant	Maître de Conférences à l'Université Pierre et Marie Curie

À Erwan,
Léa et Louna...

Remerciements

Je tiens à remercier tout d'abord Madame Isabelle Guérin Lassous, Monsieur Thierry Turletti ainsi que Monsieur André-Luc Beylot qui ont accepté de faire partie de mon Jury de thèse. Merci ensuite à toute l'équipe NPA et en particulier aux professeurs Sébastien Tixeuil et Serge Fdida qui m'ont offert l'opportunité de réaliser cette thèse dans les meilleures conditions possibles. Merci aussi à Kim qui m'a beaucoup appris en Master, merci à Bruno qui m'a donné l'envie de poursuivre dans la recherche et merci à Anne pour son soutien. Merci également aux membres de l'ancien bureau 724. L'ambiance y était propice au partage d'idées et à l'émulation collective. Merci à Mathias avec qui j'ai apprécié les échanges scientifiques qui devenaient bien souvent philosophiques. Merci aussi à Brice et Mehdi pour leur sympathie et leur aide qui me fût bien souvent extrêmement utile pour atteindre les sommets fixés.

Je tiens à remercier tout particulièrement Sébastien avec qui j'ai pu échanger, partager, débattre et développer mes travaux d'une manière efficace et constructive. Merci pour ses conseils précieux, le temps et l'intérêt qu'il m'a accordé durant cette thèse. Merci aussi à Aurore.

Je tiens aussi à remercier ma mère et mon père sans quoi rien n'aurait été possible. Merci à mon père qui a toujours été pour moi un modèle. Merci à lui de m'avoir entre-autre éveillé à la science. Merci à ma mère, qui m'a donné l'envie de découvrir. Merci vraiment à eux deux qui m'ont toujours si bien soutenu.

Evidemment je remercie aussi Virginie. Bien souvent la cohabitation avec cette thèse fût compliquée. Je la remercie d'avoir supporté mes moments d'absence, où, en pleine réflexion métaphysique sur un problème insoluble, j'étais coupé du monde. Merci de son soutien et de sa patience.

Pour conclure je tiens à remercier mon frère Erwan et mes filles à qui je dédie cette thèse. Merci à Erwan qui m'a ouvert la voie, merci pour les bons moments de notre enfance. Merci à Léa et Louna pour toute l'inspiration et la force que vous me donnez.

Résumé

Avec l'essor des services multimédia, garantir une réelle qualité de service est devenu une des grandes priorités de la nouvelle génération de réseaux sans fil. Cela implique que les algorithmes d'allocation de ressources soient capables d'assurer à la fois une équité élevée entre utilisateurs, quels que soient leurs types de trafic et leur mobilité dans la cellule, une différenciation de service efficace et la maximisation du débit global du système.

Dans ce contexte, nos premiers travaux ont porté sur le développement d'un nouveau système de mesure de la qualité de service dans les réseaux multimédia. Ce système permet de comparer, sur une même échelle de valeur, la qualité de service procurée à chaque utilisateur lorsque les types de trafic transmis sont fortement hétérogènes et d'évaluer efficacement les performances des algorithmes d'allocation de ressources.

De là, nos travaux se sont focalisés sur ce qui constitue la contribution majeure de cette thèse, à savoir proposer de nouveaux algorithmes plus efficaces adaptés à une couche physique utilisant la modulation OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). En effet, dans les réseaux sans fil, en raison du phénomène d'affaiblissement multi-trajets, les utilisateurs ne peuvent pas tous bénéficier d'une même capacité de transmission/réception même s'ils occupent la même position et utilisent la même fréquence à un instant donné. Déjà implanté dans les systèmes 802.11a/g et 802.16, l'OFDM permet une transmission sur plusieurs fréquences en parallèle. Le principe de nos algorithmes est donc d'exploiter ces dernières de manière opportuniste afin de les allouer à l'utilisateur qui en tirera à un instant donné le meilleur profit. Dans ce cadre, trois ordonnanceurs ont été développés dans une approche inter-couches. Ils tiennent compte à la fois de paramètres issus de la couche physique comme les débits possibles associés à chaque couple utilisateur/fréquence mais aussi des contraintes applicatives telles que le taux de perte de paquets, le taux d'erreur par bit, le retard maximum admissible... Grâce à un système de priorités dynamiques entre les différents utilisateurs qui tire avantage de la diversité temporelle, fréquentielle et multi-utilisateurs, la capacité du réseau est ainsi maximisée tout en assurant un haut niveau de qualité de service égal pour tous, ce qui permet d'assurer la gestion efficace des flux multimédia dans les réseaux sans fil actuels et futurs.

Mots-clés :

“Orthogonal Frequency Division Multiplexing” (OFDM), Ordonnancement opportuniste, Approche inter-couches, Diversité multi-utilisateurs, Multimédia, Qualité de Service, Équité, Différenciation de service, Affaiblissement de propagation, Atténuation liée aux multi-trajets.

Table des matières

1	Introduction	11
1.1	L'Allocation de ressources dans les réseaux sans fil	12
1.1.1	Les contraintes des réseaux sans fil	12
1.1.2	La technique OFDM	13
1.1.3	Le challenge de l'allocation de ressources OFDM	15
1.2	Contributions	18
1.2.1	Nouvel outil de mesure de la QoS	18
1.2.2	Gestion efficace de la mobilité intracellulaire	19
1.2.3	Proposition d'un ordonnanceur opportuniste adapté aux réseaux modernes sans fil	19
1.3	Hypothèses de travail	20
1.4	Organisation de la thèse	22
2	Etat de l'Art	25
2.1	Les algorithmes classiques	26
2.1.1	Le Round Robin (RR)	27
2.1.2	L'allocation aléatoire (RA)	28
2.1.3	Bilan	28
2.2	Les algorithmes équitables	29
2.2.1	Le Fair Queueing (FQ)	29
2.2.2	Le Max-Min Fair (MMF)	29
2.2.3	Le Weighted Fair Queueing (WFQ)	30
2.2.4	Bilan	31
2.3	Les algorithmes opportunistes	31
2.3.1	Le Maximum Signal-to-Noise Ratio (MaxSNR)	31
2.3.2	Le Proportional Fair (PF)	34
2.3.3	Algorithmes hybrides MaxSNR/PF	35
2.3.4	Autres algorithmes opportunistes hybrides	36
2.3.5	Bilan et discussion	36
2.4	Conclusion	37

3	Nouvel Outil de Mesure de la QoS	41
3.1	Introduction	42
3.1.1	Critères génériques de performance des ordonnanceurs	42
3.1.2	Evaluation de l'équité	43
3.1.3	Nécessité d'un nouvel outil de mesure	43
3.2	Le <i>Packet Delay Outage Ratio</i> (PDOR)	44
3.3	Conclusion	46
4	Améliorations des Ordonneurs Opportunistes Actuels	51
4.1	Problématique et approche adoptée	52
4.2	Le Fair Maximum Signal-to-Noise Ratio (FMaxSNR)	53
4.3	Le Compensated Proportional Fair (CPF)	55
4.4	Diagramme d'états-transitions du FMaxSNR et du CPF	57
4.5	Avantages	59
4.6	Conclusion et limites	60
5	Le Weighted Fair Opportunistic Scheduler (WFO)	63
5.1	Approche inter-couches	64
5.2	Algorithme	65
5.2.1	Maximisation du débit et intégrité des données	65
5.2.2	Différenciation de service, garantie d'équité et respect des contraintes temporelles	66
5.2.3	Cœur de l'algorithme	68
5.2.4	Calibration de l'algorithme et première évaluation de performances .	69
5.2.5	Diagramme d'états-transitions de l'algorithme WFO	72
5.3	Conclusion	74
6	Evaluation de performances	77
6.1	Introduction	78
6.2	Hypothèses et paramétrage général des simulations	78
6.3	Premier scénario : influence du facteur distance	80
6.3.1	Contexte statique	80
6.3.2	Contexte mobile	89
6.3.3	Bilan	93
6.4	Second scénario : trafics hétérogènes	93
6.4.1	Sources à besoins différents en termes de débit	93
6.4.2	Sources à contraintes de retard différentes	95
6.5	Troisième scénario : analyse globale des performances des ordonneurs .	96
6.6	Conclusion	98
7	Conclusion	101
7.1	Synthèse des contributions	102
7.2	Perspectives	102
7.3	Publications	105

7.3.1	Journal international avec comité de lecture	105
7.3.2	Chapitres de livres	105
7.3.3	Actes de conférences internationales avec comité de lecture	105
7.3.4	Rapports techniques	106
Liste des figures		108
Liste des tableaux		112
Références		115

Chapitre **1**

Introduction

1.1	L'Allocation de ressources dans les réseaux sans fil	12
1.1.1	Les contraintes des réseaux sans fil	12
1.1.2	La technique OFDM	13
1.1.3	Le challenge de l'allocation de ressources OFDM	15
1.2	Contributions	18
1.2.1	Nouvel outil de mesure de la QoS	18
1.2.2	Gestion efficace de la mobilité intracellulaire	19
1.2.3	Proposition d'un ordonnanceur opportuniste adapté aux réseaux modernes sans fil	19
1.3	Hypothèses de travail	20
1.4	Organisation de la thèse	22

1.1 L'Allocation de ressources dans les réseaux sans fil

1.1.1 Les contraintes des réseaux sans fil

Cette dernière décennie a été marquée par l'essor sans précédent de l'Internet, et notamment de l'Internet sans fil. En effet, accéder au réseau mondial est aujourd'hui devenu un enjeu majeur du développement de nos sociétés comme en témoigne l'explosion des ventes de téléphones de quatrième génération. Le nombre d'utilisateurs est donc en constante augmentation et nécessite des débits toujours plus élevés. En outre, l'émergence des nouveaux services multimédia (voix sur IP, vidéoconférence, streaming, e-mail, partage de fichiers, ...) requiert une Qualité de Service (QoS) accrue [1, 2].

Si, dans les réseaux filaires, il est raisonnable de penser que ces besoins pourraient être comblés par l'augmentation du nombre de liens et de routeurs (sur-dimensionnement où *over-provisioning* [3]), cette solution ne peut être envisagée dans les réseaux sans fil [4]. En effet, la ressource y est extrêmement limitée et, de surcroît, soumise à divers aléas qui compliquent particulièrement les transmissions. Le débit et la qualité dépendent fortement de la puissance du signal reçu par le destinataire et cette dernière fluctue en raison de plusieurs phénomènes [5, 6] : l'atténuation due à la dispersion de sa puissance au cours de la propagation (*path loss*), l'effet de masque (*shadowing*) et l'évanouissement multi-trajet (*multipath fading*).

Le *path loss* est causé par la dissipation de la puissance du signal dégagé par l'émetteur. Tout signal radio subit en effet une atténuation de sa puissance au cours de son trajet proportionnelle au facteur C/d^{α_l} où d représente la distance qui sépare l'émetteur du récepteur et α_l et C sont des paramètres qui dépendent de l'environnement (milieu, géométrie des lieux). Selon le modèle considéré (espace libre ou non), l'exposant d'affaiblissement α_l prend des valeurs généralement comprises entre 2 et 4. La présence d'obstacles sur la trajectoire du signal peut cependant accentuer cette atténuation. α_l peut alors parfois excéder la valeur 4.

Comme illustré sur la figure 1.1, la puissance du signal et donc le débit auquel on peut transmettre varient autour d'une moyenne fixée par le *path loss* qui décroît lentement avec la distance (de l'ordre de 100 à 1000 mètres). Cette variation est perceptible tout d'abord à l'échelle de 10 à 100 mètres. On parle d'effet de masque ou *shadowing*. Modélisée par une loi lognormale, cette variation lente est causée par la présence d'objets entre l'émetteur et le récepteur qui dissipent l'énergie. Quand ces obstacles à la transmission dissipent trop de puissance, le signal n'est plus exploitable.

Au *path loss* et au *shadowing* s'ajoute le *multipath fading*. Cette fluctuation apparaît à une échelle bien plus petite que la précédente, de l'ordre de la milliseconde et de la longueur d'onde. Elle est due à la décomposition naturelle du signal d'origine en différents

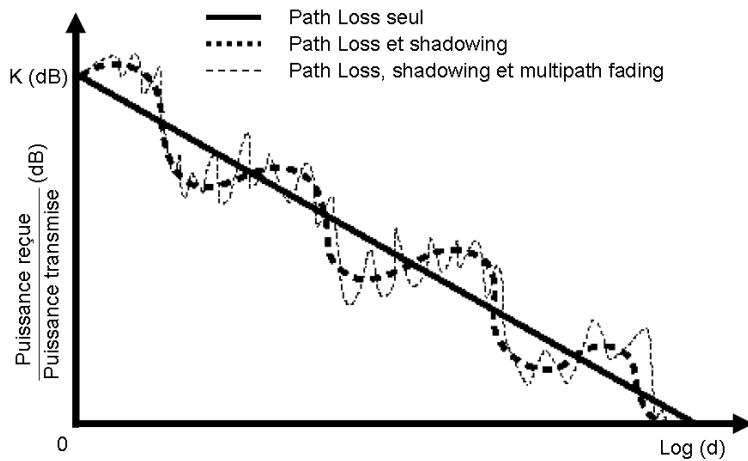


FIG. 1.1 – Variation de la puissance du signal en fonction de la distance pour une fréquence donnée.

sous-signaux qui vont emprunter différentes trajectoires vers la destination. Ces trajectoires résultent de la rencontre d’obstacles (réflexions et diffractions) et la traversée de milieux d’indices différents (réfractions). À réception, selon la fréquence utilisée, ces « multi-trajets » sont plus ou moins déphasés et se recombinent de manière constructive ou destructive. Dans ce dernier cas, la puissance reçue est beaucoup plus faible que celle attendue. On parle alors de trou d’évanouissement (*fading hole*). Lorsque l’émetteur et le récepteur sont en ligne de vue directe (*Line Of Sight, LOS*), cette variation peut être modélisée par une loi de Rice. Dans le cas contraire (*Non Line of Sight, NLOS*), elle peut être modélisée par une loi de Rayleigh (la loi de Rayleigh est utilisée quand les différents trajets ont des puissances comparables).

1.1.2 La technique OFDM

Les transmissions sans fil sont historiquement monoporteuses. Cependant, avec le besoin constant d’augmenter les débits, cette technique atteint actuellement ses limites. En effet, une transmission monoportuese à débit élevé nécessite l’utilisation d’une durée symbole faible, ce qui a pour effet d’augmenter le taux d’erreur par bit¹ (*Bit Error Rate (BER)*). Dans ce contexte, afin d’augmenter les débits sans trop détériorer le BER des utilisateurs, une solution consiste à augmenter la largeur du spectre fréquentiel utilisé. Cependant, lorsque la bande de fréquence utilisée est trop large, le canal risque d’être sélectif en fréquence (voir figure 1.2). Un tel canal présente alors une réponse fréquentielle qui n’est

¹Plus précisément, lorsque la durée des symboles est trop courte, celles-ci deviennent proche de l’étalement des retards de la réponse impulsionale ce qui amplifie les effets des Interférences Entre Symboles (IES) et donc le risque de perte d’information.

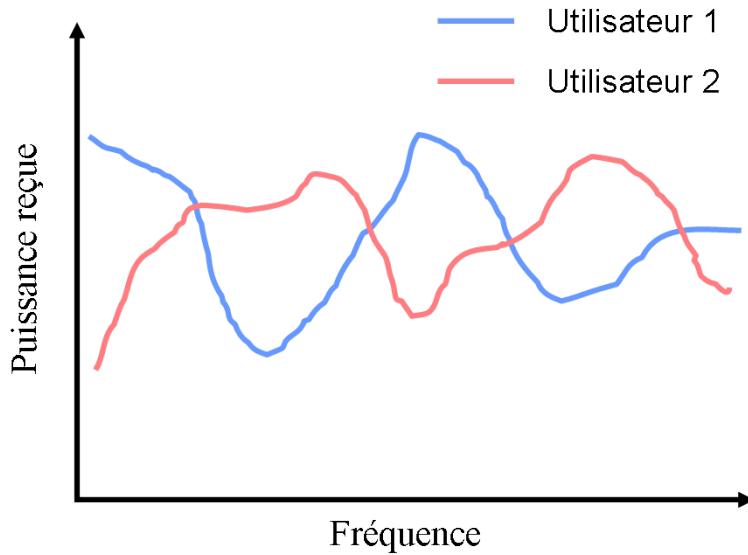


FIG. 1.2 – Canaux sélectifs en fréquence.

pas plate comme dans le cas idéal mais comporte au contraire de fortes fluctuations variant en fonction de la fréquence, du temps et de la position des utilisateurs dont il est difficile de combattre les effets.

Pour remédier à ces désagréments, l'idée de répartir l'information sur un grand nombre de porteuses a été introduite. Avec l'*Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) [7, 8], la bande passante est partagée en N sous-bandes appelées sous-porteuses (*subcarriers*). Le principe est ensuite de diviser la suite des symboles d'origine, de durée T_s , en N sous-suites de symboles de durée $T = N \times T_s$. Chaque sous-suite est alors émise sur une sous-bande différente .

L'information est ainsi répartie sur un grand nombre de porteuses composées de sous-canaux très étroits de largeur inférieure à la bande de cohérence du canal (si N est suffisamment grand). Pour ces derniers, la réponse fréquentielle du canal peut être considérée comme constante. Ces sous-canaux sont donc non-sélectifs en fréquence, ce qui évite les distorsions du signal et réduit considérablement le risque de pertes d'information.

Plébiscité dans de nombreux ouvrages références qui mettent en avant le gain engendré par son utilisation en termes d'efficacité spectrale [5, 7, 9, 10], l'OFDM se positionne aujourd'hui comme la technologie des futurs réseaux sans fil large bande (4G) [11]. Elle permet d'augmenter les débits de manière significative. Cela explique en partie pourquoi pour une même bande de fréquence (celle des 2,4 GHz), l'IEEE 802.11g atteint un débit théorique maximal de 54 Mbit/s alors que son homologue non OFDM, l'IEEE 802.11b, ne permet d'atteindre que 11 Mbit/s. Cette technique de modulation très prometteuse imaginée dans les années 60 est déjà utilisée dans de nombreux réseaux :

- Radio et télé-diffusions numériques terrestres : *Digital Audio Broadcasting* (DAB), *Terrestrial Digital Multimedia Broadcasting* (T-DMB) et *Digital Video Broadcasting - Terrestrial* (DVB-T),
- *Asymmetric Digital Subscriber Line* (ADSL),
- IEEE 802.11a et g,
- IEEE 802.16 ou *Worldwide Interoperability for Microwave Access* (WiMax),
- *Long Term Evolution* (LTE)...

Pour conclure, l'OFDM permet d'accroître la capacité du système et d'apporter une meilleure résistance aux perturbations dues aux multi-trajets [9, 12]. Le succès de l'OFDM est grandissant d'autant plus qu'il offre une très grande flexibilité dans l'allocation des ressources [13]. En effet, chaque sous-porteuse peut être allouée à différents utilisateurs avec des débits spécifiques. Cette diversité fréquentielle procurée par la subdivision de la bande passante en sous-porteuses, ajoutée à la diversité multi-utilisateurs, peut conduire à un système extrêmement efficace s'il est utilisé avec un algorithme d'allocation de ressources adéquat.

1.1.3 Le challenge de l'allocation de ressources OFDM

Dans l'article [14], les auteurs proposent une réflexion sur l'utilisation de l'OFDM dans les réseaux sans fil et principalement sur les objectifs attenant à l'allocation de ressources OFDM. Deux grands verrous restent à lever :

- Le premier est de maximiser le débit global admissible dans le réseau. Un débit plus important permettra d'assurer un meilleur écoulement du trafic et de réduire ainsi le délai d'attente et la gigue. C'est la première condition pour garantir une qualité de service de plus en plus essentielle à chaque utilisateur du réseau. De plus, accroître le débit global du réseau est une nécessité aujourd'hui afin de supporter correctement l'augmentation régulière du nombre d'utilisateurs.
- La seconde priorité est d'optimiser l'équité entre ces utilisateurs. C'est en effet la deuxième condition nécessaire pour garantir une QoS élevée à tous dans le réseau quel que soit le contexte (accès de qualité au réseau quels que soient les positions des utilisateurs, les applications utilisées, etc.).

Si la maximisation du débit global est facile à évaluer (il suffit de mesurer le nombre de bits écoulés dans le réseau sur une période de temps donnée), mesurer l'équité est en revanche bien plus complexe qu'il n'y paraît. En effet, contrairement à la notion de débit, la notion d'équité est ambiguë et subjective. Nous verrons d'ailleurs qu'il existe différentes gradations d'équité dans un réseau, toutes dépendantes des paramètres observés. Lorsque le terme « équité » est utilisé, il est donc essentiel de définir avec précision ce qui est considéré comme « équitable » et les critères d'évaluation à utiliser.

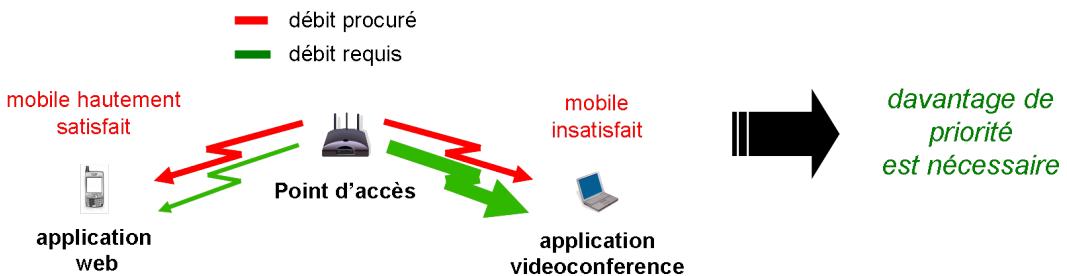


FIG. 1.3 – Illustration du problème engendré par une allocation équitable en termes de débit (niveau 2).

Définition de la notion d'équité :

Dans cette sous-section, les trois niveaux d'équité considérés tout au long de cette thèse sont définis. Ces derniers sont classés dans un ordre croissant de pertinence :

- **Niveau 1** : Au premier niveau, l'équité peut être considérée en termes d'accès à la ressource. On peut raisonnablement penser qu'allouer le même nombre d'unités de ressource à chaque utilisateur est juste puisque leur attribuer une même bande de fréquence pendant une même durée correspondrait à leur fournir un même débit dans un contexte filaire.
- **Niveau 2** : Cependant, même si une telle allocation semble équitable dans une transmission filaire, elle ne l'est pas dans un réseau sans fil. En effet, compte tenu de la disparité des conditions radio entre utilisateurs, allouer une même quantité d'unités de ressource à chaque utilisateur ne leur garantit en rien un même débit. Partant de ce constat, le niveau supérieur d'équité consiste à assurer, pour chaque utilisateur, un débit équivalent.
- **Niveau 3** : Dans les réseaux sans fil, il est aujourd'hui indispensable d'être en mesure de supporter les trafics multimédia et pour ces derniers, l'important est d'assurer une qualité de service globale élevée. Considérer uniquement les débits fournis par le réseau est donc très réducteur pour juger d'une éventuelle équité. En effet, offrir par exemple un même débit à deux utilisateurs alors que l'un a de faibles besoins (en termes de débit, retard maximum, gigue, BER, ...) et que l'autre a de plus fortes contraintes semble encore peu juste (cf. figure 1.3). Donnant « trop » au premier, celui-ci sera toujours grandement satisfait, alors que le second, le sera forcément nettement moins. En conséquence, il est logique de se poser les questions suivantes : d'une manière générale, si l'on considère deux utilisateurs aux besoins radicalement différents, est-ce réellement équitable de leur attribuer les mêmes ressources, les mêmes débits ? On peut donc se demander comment définir de manière adéquate

la notion d'équité... En réalité, l'équité optimale n'est pas d'assurer à tous le même débit mais plutôt de leur assurer le même degré de satisfaction. Par conséquent, dans cette thèse, nous considérons que le plus haut niveau d'équité est atteint lorsque le rapport $QoS_{offerte}/QoS_{demandée}$ est le même pour tous les utilisateurs. Nous verrons que ce dernier niveau est très difficile à atteindre puisqu'il requiert de pouvoir procurer et gérer une différenciation de service² efficace. Cela explique en partie pourquoi lorsque l'équité est assurée dans les systèmes actuels, ce n'est généralement qu'au niveau 1 voire 2.

Les ordonnanceurs :

L'OFDM ne suffit pas, seule, à répondre aux exigences croissantes rencontrées dans les réseaux sans fil. Cette technique de modulation doit être accompagnée d'algorithmes d'allocations de ressources efficaces communément appelés « ordonnanceurs » ou « *schedulers* ». Ces derniers doivent être capables de profiter de la grande flexibilité qu'offre l'OFDM afin d'accroître les débits de manière significative tout en procurant une équité élevée.

Principalement, une classe d'algorithmes (ordonnanceurs) a émergé afin de répondre à cette problématique : les ordonnanceurs opportunistes. Ces algorithmes d'allocation de ressources utilisent habilement les informations sur les états des liens, indicateurs des SNRs relatifs à chaque couple « sous-porteuse ; utilisateur » (*Channel State Information* (CSI) ou *Channel Quality Indicator* (CQI) [15–17]). Pour un SNR donné, chaque modulation (MDP-2, MAQ-M...) offre un BER et un débit différent. La fonction première des CSIs est donc de permettre d'adapter la modulation ou son ordre en fonction de l'atténuation subie sur chaque lien afin d'obtenir le meilleur débit tout en respectant le BER ciblé [5, 9]. Lorsqu'une sous-porteuse subit de fortes atténuations pour un utilisateur donné, « l'état des liens » pour ce couple « sous-porteuse ; utilisateur » sera identifié comme « dégradé » via les CSIs et le débit de transmission associé sera faible voire nul. Inversement, si pour un autre utilisateur cette fréquence subit peu d'atténuation, le débit associé au couple « sous-porteuse ; utilisateur » sera cette fois-ci élevé. La force des ordonnanceurs opportunistes est donc d'être capable d'adapter le débit de chaque transmission aux conditions radio grâce aux CSIs (limitant ainsi les pertes) mais aussi de tirer avantage de la diversité fréquentielle et multi-utilisateurs pour allouer judicieusement les ressources aux utilisateurs qui ont les conditions de transmission/réception les plus favorables (un bon rapport signal/bruit, un bon CSI) et ainsi optimiser le débit du système.

Cependant, avec ces ordonnanceurs opportunistes, le problème d'équité reste entier. En effet, les utilisateurs éloignés du point d'accès ont des canaux statistiquement moins

²Différencier les flux consiste à traiter chaque utilisateur en fonction de sa demande, ses besoins et ses capacités (et non pas les traiter tous de manière uniforme).

favorables que les utilisateurs plus proches ce qui les pénalise. Une partie seulement des objectifs à atteindre est donc remplie d'autant plus que la différenciation de service n'est généralement pas non plus assurée. Aujourd'hui, les ordonnanceurs actuels n'offrent tout simplement pas de solution pour augmenter l'équité sans réduire la capacité du système. L'essor des communications sans fil passe donc par la résolution conjointe de ces problèmes d'optimisation d'équité et de maximisation du débit global. Celle-ci nécessitera la proposition de nouveaux ordonnanceurs opportunistes adaptés aux réseaux sans fil et à l'OFDM, qui, en utilisant une approche inter-couches, permettront de s'affranchir du compromis « équité – débit » [18].

1.2 Contributions

Cette thèse étudie le problème de l'allocation de ressources dans les réseaux sans fil à large bande et en particulier ceux utilisant la technologie OFDM. L'objectif principal est double :

- **maximiser le débit** global du système afin de pouvoir faire face à un nombre d'utilisateurs en constante augmentation,
- **atteindre un niveau d'équité optimal** afin de **maximiser la qualité de service** fournie aux utilisateurs et permettre l'utilisation des nouveaux services multimédia en fort développement.

La problématique est donc de trouver comment atteindre conjointement ces deux objectifs via l'élaboration d'ordonnanceurs opportunistes efficaces.

1.2.1 Nouvel outil de mesure de la QoS

Nous avons abordé le problème en étudiant les performances et particularités des ordonnanceurs existants. De nombreux travaux de recherche ont été effectués sur l'allocation de ressources OFDM aboutissant à la publication de très nombreux algorithmes. Au vu du grand nombre d'ordonnanceurs proposés, le premier problème consista à essayer de les comparer pour les classifier. Or, nous verrons par la suite que les systèmes de mesure habituels sont insuffisants pour les juger correctement, sur un même pied d'égalité. Trouver un nouvel outil de mesure pertinent a donc été la première contribution de cette thèse.

Nos recherches ont abouti à la proposition d'un nouvel outil de mesure de la QoS. Celui-ci a permis d'évaluer et de comparer plus aisément les différents ordonnanceurs permettant de mettre en exergue, entre autre, les performances élevées des ordonnanceurs opportunistes et en particulier celles de deux d'entre eux : le Maximum Signal-to-Noise Ratio (MaxSNR) [19–21] et le Proportional Fair (PF) [22–27].

1.2.2 Gestion efficace de la mobilité intracellulaire

Le MaxSNR et le PF augmentent le débit du système d'une manière quasi-optimale mais sont en revanche très peu équitables, en particulier lorsque les mobiles sont répartis à des distances différentes du point d'accès. La seconde contribution de cette thèse a été de proposer deux améliorations de ces ordonnanceurs, le *Fair Maximum Signal-to-Noise Ratio* (FMaxSNR) [28] et le *Compensated Proportional Fair* (CPF) [29, 30]. Il s'agit d'introduire dans les algorithmes d'origine un poids calculé à partir des positions relatives des utilisateurs. Celui-ci permet de compenser leur éventuel éloignement en leur accordant proportionnellement plus de priorités mais sans nuire à la capacité globale du système. Tout en conservant les avantages du MaxSNR et du PF en termes de maximisation du débit, une QoS homogène est donc garantie aux utilisateurs quelles que soient leurs positions permettant ainsi une gestion efficace de la mobilité intracellulaire.

1.2.3 Proposition d'un ordonnanceur opportuniste adapté aux réseaux modernes sans fil

Les solutions précédentes bien que très efficaces et peu complexes, ne règlent pas pour autant tous les problèmes. En effet, la différenciation de service n'est toujours pas assurée et un haut niveau de qualité de service ne peut donc pas toujours être garanti. Ce problème récurrent dans le domaine de l'allocation de ressources opportuniste pose un réel challenge. Il faut arriver à différencier les flux de manière adéquate sans pour autant trop complexifier les algorithmes et tout en continuant à optimiser la capacité du système et l'équité.

La troisième et la plus ambitieuse contribution de cette thèse est de réussir ce challenge. Nous avons donc proposé par la suite un nouvel algorithme d'allocation de ressources appelé *Weighted Fair Opportunistic* (WFO) [31–35]. Conçu dans une approche inter-couches, le WFO prend en compte les spécificités physiques des transmissions sans fil OFDM ainsi que les contraintes des couches supérieures comme les contraintes de qualité de service. Les informations physiques sont utilisées pour prendre avantage de la diversité temporelle, fréquentielle et multi-utilisateurs et ainsi maximiser le débit. Les informations des couches supérieures sont exploitées par le biais d'un système de poids qui introduit des priorités dynamiques entre les différents utilisateurs afin d'assurer une qualité de service adaptée au besoin de chacun et un taux de satisfaction égal pour tous. Cela produit un algorithme efficace capable de différencier les services, condition indispensable pour gérer les flux multimédia dans les réseaux actuels et futurs. Le WFO optimise le débit à un même niveau que les meilleurs ordonnanceurs opportunistes, voire mieux. Il assure aussi, sans aucun compromis sur la capacité du système, une équité de haut niveau entre mobiles. De multiples scénarios ont été testés et permettent de conclure que le WFO surpasse les ordonnanceurs OFDM actuels.

1.3 Hypothèses de travail

Nous nous sommes focalisés dans cette thèse sur l'allocation de ressources dans un contexte monocellulaire pour le sens montant et descendant. Les points d'accès ont donc des paquets à recevoir ou à délivrer aux utilisateurs situés dans leur zone de couverture. Nous considérons un contexte mobile. Les « clients » du réseau seront donc désignés indifféremment par la suite par le terme « mobiles » ou « utilisateurs ». Nous supposerons également une approche centralisée (cf. figure 1.4). Centraliser l'allocation de ressources est en effet une bonne approche pour maximiser le débit en évitant, entre autres, les collisions entre trames. En outre, une telle approche permet d'accorder simplement et efficacement différentes priorités aux mobiles pour l'accès au médium en fonction de leurs besoins et de l'état de leurs liens, prérequis obligatoire pour espérer garantir un haut niveau d'équité et de qualité de service dans les réseaux OFDM. Par la suite, nous considérerons également que les paquets originaires du réseau de cœur seront mis en file d'attente FIFO (*First In, First Out*) au niveau du point d'accès qui procèdera alors à l'allocation des ressources dans le sens descendant. Dans le sens montant, les mobiles signaleront leur charge de trafic à transmettre au point d'accès. Ce dernier construira alors la carte d'allocation de la ressource radio en fonction de ces informations. De plus, il est à noter que nous considérerons qu'une synchronisation entre les mobiles et le point d'accès est réalisée comme décrit par Morelli et Beek [13, 36] afin de permettre l'allocation flexible des ordonnanceurs opportunistes.

Nous prendrons également comme postulat tout au long de cette thèse l'existence d'un contrôle d'admission efficace opérant dans le réseau. Ce dernier est en effet essentiel pour garantir la QoS puisqu'il permet d'éviter que la somme des flux à traiter n'excède sur le long terme la capacité du système (à court terme, cela est toléré). La problématique du contrôle d'admission étant bien différente de celle des algorithmes d'allocation de ressources sur lesquels nous nous sommes penchés nous ne traiterons pas en effet cet aspect du problème dans cette thèse. Cependant, nous tenons à souligner que lors de nos travaux, nous avons toutefois réfléchi à celle-ci et nous avons quelques éléments de réponse que nous développerons dans nos perspectives de recherche.

Au niveau de la couche physique, nous supposons l'existence d'une structure de trames telle que celle du système IEEE 802.16-2004 [13, 37, 38] (cf. figure 1.5). Chaque trame est elle-même subdivisée en intervalles de temps de durée constante, multiple de la durée d'un symbole OFDM. Conformément au principe de l'OFDM, la totalité de la bande passante est divisée en sous-bandes de fréquences (sous-porteuses ou *subcarriers*). Le nombre de sous-porteuses est quant à lui choisi de telle sorte que la largeur de chaque sous-bande de fréquence reste inférieure à la largeur de la bande de cohérence du canal. De plus, la durée d'une trame est fixée à 2 millisecondes, soit une valeur inférieure au temps de cohérence

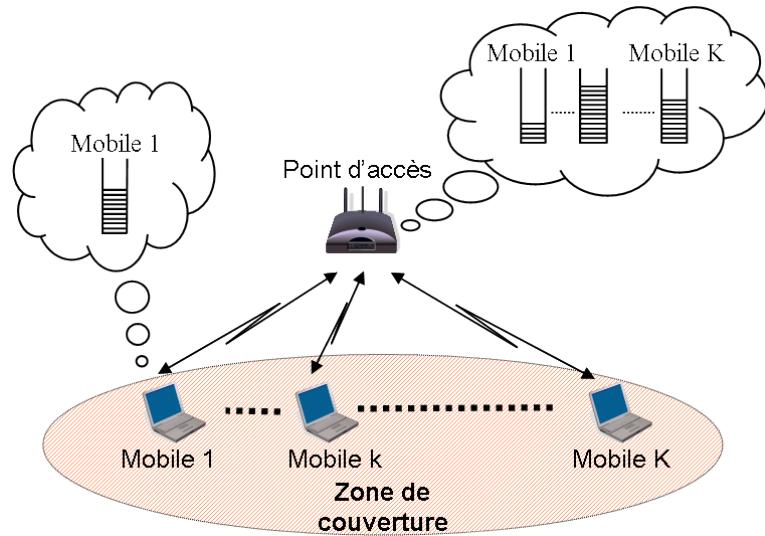


FIG. 1.4 – Allocation de ressources dans une approche centralisée.

du canal. Avec ces hypothèses, la transmission sur chaque sous-porteuse est sujette à une atténuation constante sur la durée d'une trame et par conséquent, l'état des liens pour chacune d'elle peut être considéré comme statique sur sa durée.

Nous définissons ensuite une Unité de Ressource (UR) comme le couple « *sous-porteuse, intervalle de temps* ». Chaque unité de ressource peut être allouée, selon les critères de l'ordonnanceur du système, à l'un quelconque des mobiles appartenant à la zone de couverture du point d'accès. Les transmissions sur ces unités de ressource s'effectuent ensuite à un ordre de modulation spécifique de la modulation MAQ (Modulation d'Amplitude en Quadrature) déterminé avec l'aide des CSIs, celui-ci dépendant de l'état du lien associé à la sous-bande de fréquence de l'UR considérée et pour le mobile sélectionné. L'ordonnanceur est donc supposé disposer d'une connaissance parfaite des états des liens [15–17]. Pour cela, l'atténuation subie sur chaque canal et pour chaque mobile est estimée par le point d'accès à partir de mesures de SNR. L'état d'un canal pouvant être considéré comme stable durant 50 millisecondes [39], ces estimations doivent être renouvelées toute les 25 trames. De plus, nous considérons dans cette thèse que les transmissions sur différentes URs par différents mobiles subissent des variations d'état des liens indépendantes au cours du temps [40].

Par la suite, les trames utilisées seront constituées de quatre sous-trames : l'une dédiée à la signalisation, l'autre à l'émission des données, et cela dans chaque sens de transmission (montant et descendant) :

- Les sous-trames de données seront utilisées pour la transmission des paquets à destination ou en provenance des mobiles. Dans cette thèse, nous nous intéressons à l'optimisation de l'usage de ces sous-trames de données par un ordonnancement adéquat.

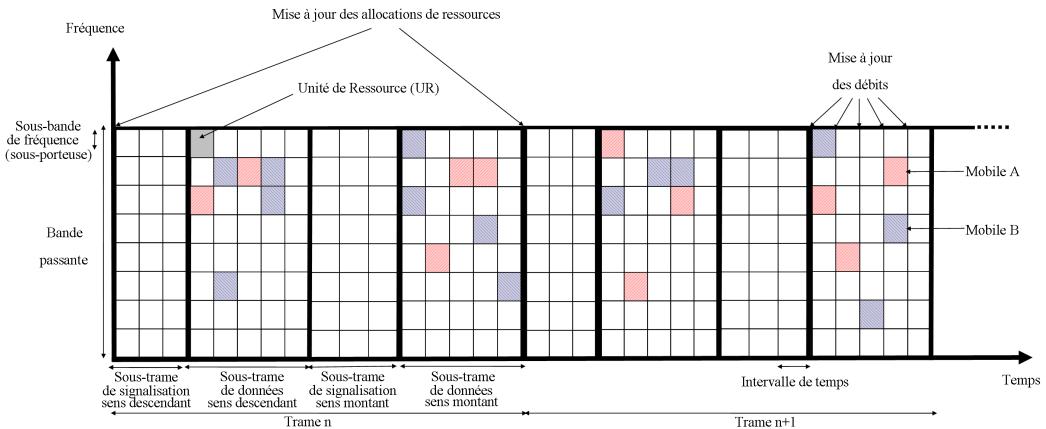


FIG. 1.5 – Structure d'une trame OFDM.

Nous ne traiterons pas en revanche la question du compromis à réaliser sur la taille respective des trames de données en sens montant et descendant.

- Dans la sous-trame de signalisation du sens descendant, le point d'accès enverra des informations de contrôle vers les mobiles. Celles-ci seront principalement utilisées pour indiquer à chaque mobile quelles Unités de Ressource leurs sont attribuées dans la prochaine trame, quel ordre de modulation a été choisi pour chacune de ces URs et quelle est la puissance d'émission recommandée dans le sens montant.
- Dans la sous-trame de signalisation du sens montant, les mobiles actifs (qui ont des paquets à transmettre) enverront une indication sur leur charge de trafic à écouler ainsi que des informations sur la qualité de service ciblée ou leur puissance de transmission. Cette sous-trame sera aussi utilisée pour établir les connexions de chaque mobile.

1.4 Organisation de la thèse

Cette thèse s'organise en sept chapitres, suivant le fil conducteur explicité en section 1.2). Le chapitre 2 décrit l'état de l'art. Les chapitres 3, 4, 5 et 6 présentent les contributions apportées par nos travaux. Le chapitre 7 conclura cette thèse et apportera une ouverture sur les prochains travaux à réaliser :

- **Dans le chapitre 2,** un état de l'art sur les ordonnanceurs des réseaux sans fil sera donné. Nous énumérerons et expliquerons leurs qualités ainsi que leurs défauts. Un tableau récapitulatif synthétisera le chapitre avec une comparaison des ordonnanceurs les plus connus.

- **Dans le chapitre 3**, nous expliquerons pourquoi les métriques actuelles d'évaluation de performances sont peu efficaces pour comparer d'une manière juste et précise les algorithmes d'allocation de ressources des réseaux sans fil. Nous présenterons ensuite la nouvelle métrique que nous proposons.
- **Dans le chapitre 4**, nous mettrons en évidence un des problèmes majeurs rencontré dans les réseaux sans fil : l'inéquité entre mobiles répartis dans l'espace de manière hétérogène. Nous expliquerons en particulier les causes de cette inéquité lorsqu'un ordonnancement MaxSNR ou PF est utilisé. Nous proposerons ensuite une amélioration pour chacun d'eux, le FMaxSNR et le CPF, afin de corriger ce problème.
- **Dans le chapitre 5**, les limites des solutions précédemment proposées seront explicitées. Une ultime solution, le WFO, résolvant les problèmes majeurs des ordonnateurs des réseaux sans fil sera alors présentée.
- **Dans le chapitre 6**, une évaluation de performances étendue avec divers scénarios sera proposée. Nous y verrons que le FMaxSNR, le CPF et le WFO maximisent la capacité dans une même mesure que les meilleurs ordonnanceurs opportunistes actuels (le PF et le MaxSNR) mais qu'ils assurent, en plus, un niveau d'équité bien supérieur tout en apportant la possibilité (avec le WFO) de faire une réelle différenciation de service.
- **Dans le chapitre 7**, nous conclurons cette thèse et proposerons une ouverture sur de futurs travaux.

Le chapitre 1 de la thèse est consacré à l'organisation de la thèse. Il comprend les sections suivantes :

1.1. Introduction : Présentation générale de la thèse, objectifs et méthodologie.

1.2. Description des données : Détails sur les données utilisées pour la recherche, leur collecte et leur analyse.

1.3. Méthodologie : Détails sur les méthodes utilisées pour la recherche, y compris les statistiques et les logiciels utilisés.

1.4. Résultats : Présentation des résultats obtenus par la recherche, avec des figures et des tables.

1.5. Conclusion : Résumé des résultats obtenus et perspectives futures de la recherche.

Le chapitre 2 de la thèse est consacré à l'analyse des résultats obtenus par la recherche. Il comprend les sections suivantes :

2.1. Analyse des données : Détails sur l'analyse des données utilisées pour la recherche, y compris les statistiques et les logiciels utilisés.

2.2. Interprétation des résultats : Interprétation des résultats obtenus par la recherche, en fonction des objectifs et méthodologie définis.

2.3. Limites et perspectives : Limites de la recherche et perspectives futures de la recherche.

Le chapitre 3 de la thèse est consacré à la conclusion de la recherche. Il comprend les sections suivantes :

3.1. Conclusion : Résumé des résultats obtenus et perspectives futures de la recherche.

3.2. Perspectives futures : Perspectives futures de la recherche et recommandations pour l'avenir.

Le chapitre 4 de la thèse est consacré à l'ensemble de la recherche. Il comprend les sections suivantes :

4.1. Conclusion : Résumé des résultats obtenus et perspectives futures de la recherche.

4.2. Perspectives futures : Perspectives futures de la recherche et recommandations pour l'avenir.

Chapitre **2**

Etat de l'Art

2.1	Les algorithmes classiques	26
2.1.1	Le Round Robin (RR)	27
2.1.2	L'allocation aléatoire (RA)	28
2.1.3	Bilan	28
2.2	Les algorithmes équitables	29
2.2.1	Le Fair Queueing (FQ)	29
2.2.2	Le Max-Min Fair (MMF)	29
2.2.3	Le Weighted Fair Queueing (WFQ)	30
2.2.4	Bilan	31
2.3	Les algorithmes opportunistes	31
2.3.1	Le Maximum Signal-to-Noise Ratio (MaxSNR)	31
2.3.2	Le Proportional Fair (PF)	34
2.3.3	Algorithmes hybrides MaxSNR/PF	35
2.3.4	Autres algorithmes opportunistes hybrides	36
2.3.5	Bilan et discussion	36
2.4	Conclusion	37

L'exploitation optimale des possibilités de transmission offerte par l'OFDM nécessite une gestion dynamique de l'allocation des ressources radio. Comme décrit précédemment, une Unité de Ressource est constituée par une bande de fréquence (sous-porteuse) et un intervalle de temps. Le débit qu'un mobile peut obtenir sur une UR dépend de la puissance de transmission, du SNR subi sur la sous-porteuse considérée et du BER ciblé par l'application. Les mécanismes d'accès multiple (de niveau MAC) visent à optimiser l'utilisation de la ressource globale disponible pour les transmissions de flux multiplexés sur l'interface radio. La problématique consiste à allouer à la fois les URs aux mobiles qui en tireront les plus hauts débits mais aussi de manière équitable. Cela est réalisé via une attribution efficace des URs à une échelle de temps de l'ordre de la trame radio (quelques ms). Au cœur de ces mécanismes, un organe central, l'ordonnanceur, situé dans la station de base, alloue la ressource radio aux mobiles en tenant compte de paramètres tels que :

- **les conditions de propagation** radio spécifiques dont ils bénéficient sur chaque unité de ressource,
- **les volumes de données** qu'ils ont à transférer/recevoir,
- **les contraintes de qualité de service** à respecter (BER, délai, gigue)...

L'objectif des ordonnanceurs est en priorité de réussir à acheminer un maximum d'informations vers la/les destination(s). Pour ce faire, il leur faut optimiser l'efficacité spectrale afin de maximiser le débit global. Ensuite, ils doivent assurer équité et différenciation de service entre les différents mobiles afin de garantir la meilleure QoS possible.

Face à la quantité d'ordonnanceurs existants, il n'est pas envisageable de faire un état de l'art exhaustif. Cependant, la plupart d'entre eux sont dérivés d'une poignée d'algorithmes « souches » que nous allons présenter dans ce chapitre. Ils sont répartis en trois grandes catégories : les algorithmes simples et anciens dérivés du filaire que l'on dénommera par le terme « classiques », les algorithmes plus complexes qui introduisent plus d'« équité » et les algorithmes « opportunistes » qui surclassent les deux premières catégories.

2.1 Les algorithmes classiques

Certains algorithmes d'allocation de ressources utilisés dans les réseaux sans fil proviennent directement du filaire. Ce sont en général les plus connus. Notamment, le Round Robin et l'allocation aléatoire sont deux ordonnanceurs très simples, facilement implémentables et qui servent régulièrement de référence et d'étalon pour mesurer le gain des performances des ordonnanceurs modernes.

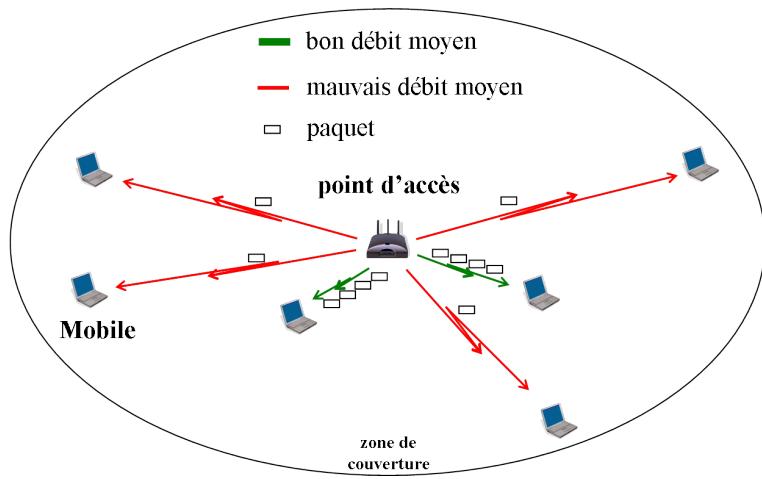


FIG. 2.1 – Lien entre position des mobiles et débits moyens possibles.

2.1.1 Le Round Robin (RR)

La plus connue des stratégies d'allocation de ressources dans les réseaux sans fil est très certainement le Round Robin (RR) [41–47]. Elle consiste à allouer, au tour par tour, l'un après l'autre, une même quantité d'unités de ressource à tous les utilisateurs. Chacun d'eux est ainsi sûr d'accéder régulièrement au medium, ce qui conduit souvent à penser que cette stratégie d'allocation est équitable. Cependant si nous pouvons parler d'équité entre utilisateurs en termes de nombre d'unités de ressource distribuées, il n'en est pas de même en termes de débit procuré à chaque utilisateur, cela pour deux raisons :

- l'affaiblissement de propagation : un utilisateur n'a pas la même capacité de transmission sur une unité de ressource selon qu'il est proche ou éloigné du point d'accès (cf. section 1.1.1, figure 2.1). Assurer une distribution homogène des unités de ressource entre utilisateurs ne revient donc pas à leur assurer un même débit. On peut noter que cet écart de débits obtenus par chaque utilisateur sera d'autant plus grand qu'ils se trouvent à des distances fortement différentes du point d'accès.
- les différentes contraintes de qualité de service : même dans un contexte idéal où tous les utilisateurs se trouveraient à une même distance du point d'accès, ils n'obtiendraient pas tous le même débit car ils n'auraient pas forcément les mêmes contraintes de qualité de service. Ils peuvent par exemple avoir différents BER cibles. Moins les contraintes de taux d'erreur par bit seront strictes, plus l'utilisateur pourra transmettre/recevoir à un ordre de modulation élevé pour une même puissance de transmission. Ainsi, pour un mobile donné qui a de faibles contraintes de QoS, le débit moyen possible par UR sera supérieur à celui d'un autre mobile aux contraintes plus strictes.

De même, on peut imaginer par exemple un utilisateur capable de transmettre avec une plus grande puissance qu'un autre. Dans ce cas, il pourra transmettre, sur une même unité de ressource et à des conditions de transmission équivalentes, un débit plus élevé.

Sur les trois niveaux d'équité définis en introduction, le Round Robin n'atteint donc que le premier. L'équité de niveau 3, en termes « d'égale satisfaction » de chaque utilisateur, est par conséquent extrêmement faible voire nulle. En effet, il n'y a aucune prise en compte des besoins des utilisateurs en termes de débit souhaité ou de retard maximum de paquets. Les utilisateurs se voient donc attribuer un débit qui est sans relation avec leurs besoins. Avec le Round Robin, les mobiles qui utilisent des applications temps réel ou nécessitent un haut débit se voient allouer autant de ressources radio que d'autres à faibles besoins, utilisant par exemple des applications de type « best effort ». Le deuxième groupe bénéficiera ainsi d'une qualité de service exceptionnelle par rapport à ses besoins, au détriment du premier fortement insatisfait et cet état de fait sera d'autant plus accentué que les utilisateurs à fortes contraintes de qualité de service se situent loin du point d'accès.

Pour conclure, le Round Robin ne tient pas compte de la position, des capacités et des besoins de chaque utilisateur. Il alloue aveuglément la même quantité d'unités de ressource à chacun d'eux sans aucune possibilité de différencier les services et donc d'assurer une quelconque qualité de service.

2.1.2 L'allocation aléatoire (RA)

Une autre technique d'allocation de ressources extrêmement répandue est l'Allocation Aléatoire (Random Access (RA)) [48]. Cette technique d'ordonnancement est particulièrement simple à mettre en oeuvre et donc largement implantée. Il s'agit tout simplement d'allouer la ressource radio de façon aléatoire entre les utilisateurs. Tous les utilisateurs ayant statistiquement la même chance d'accéder au médium, ils recevront sur le moyen/long terme un même nombre d'unités de ressource quels que soient leurs besoins. Allouer ainsi la ressource conduit donc sur le moyen/long terme à la distribuer d'une manière homogène et revient à procurer les mêmes performances réseau que le Round Robin.

2.1.3 Bilan

Les méthodes conventionnelles telles que le Round Robin ou l'Allocation Aléatoire sont par leur simplicité de mise en oeuvre des standards de l'ordonnancement. Cependant, bien qu'en apparence équitables, leurs incapacités à prendre en compte les particularités des flux des utilisateurs conduit inévitablement à une incapacité à différencier les services. Par conséquent, satisfaire d'une manière équitable les utilisateurs et assurer une quelconque

qualité de service est impossible. De plus, ces ordonneurs sont conçus à l'origine pour les réseaux filaires et ne sont donc pas bien adaptés aux environnements sans fil : ne tenant pas compte des CSI, ils allouent rarement les URs aux mobiles qui pourraient en tirer le meilleur profit et procurent donc de très faibles débits. Vu l'essor fulgurant des nouvelles technologies et le nombre toujours plus grand d'utilisateurs, apprendre à mieux utiliser la ressource radio apparaît aujourd'hui comme un objectif crucial. Cela rend les algorithmes « classiques » obsolètes.

2.2 Les algorithmes équitables

De nombreux travaux ont été effectués dans la conception d'ordonneurs plus efficaces tentant de corriger les défauts des précédents ordonneurs. Plus complexes, ils permettent d'apporter une amélioration en procurant généralement une meilleure équité voire une différentiation de service.

2.2.1 Le Fair Queuing (FQ)

Avec le Fair Queuing (FQ) [49–52], pour un lien de débit possible D , chacun des K utilisateurs actifs sera servi à hauteur de D/K . Le Fair Queuing est plus équitable que le Round Robin puisqu'il assure le même débit à chaque utilisateur. L'équité de niveau 2 est donc atteinte ici. Cependant, les besoins des utilisateurs restent ignorés, les utilisateurs nécessitant plus de débit restent toujours pénalisés face aux autres. La différenciation de service et donc un réel support de la qualité de service restent inexistant.

2.2.2 Le Max-Min Fair (MMF)

L'allocation de ressources *Max-Min Fair* [53–59] consiste à attribuer les URs de manière itérative de telle sorte que le débit global offert à chaque utilisateur augmente progressivement et de manière identique. Lorsqu'un utilisateur a reçu le débit qu'il demande, plus aucune UR ne lui est attribuée et l'exécution de l'algorithme se poursuit avec les autres utilisateurs. L'algorithme s'arrête lorsque tous les utilisateurs sont satisfaits ou que toutes les URs ont été distribuées.

Le résultat d'une telle allocation est illustré dans la figure 2.2. Cette allocation est proche du *Fair Queuing* et de ce fait présente les mêmes spécificités. En effet, ici, les mobiles obtiennent des débits égaux (mis à part ceux qui sont satisfaits rapidement et qui se contentent de moins). Au final, les consommateurs à faibles besoins sont largement avantagés car leur débit souhaité est pratiquement toujours fourni ; ils sont donc très souvent pleinement satisfaits. En revanche, les autres qui demandent plus se partagent, certes équitablement, les ressources restantes mais elles sont souvent insuffisantes à leur satisfaction (notons que

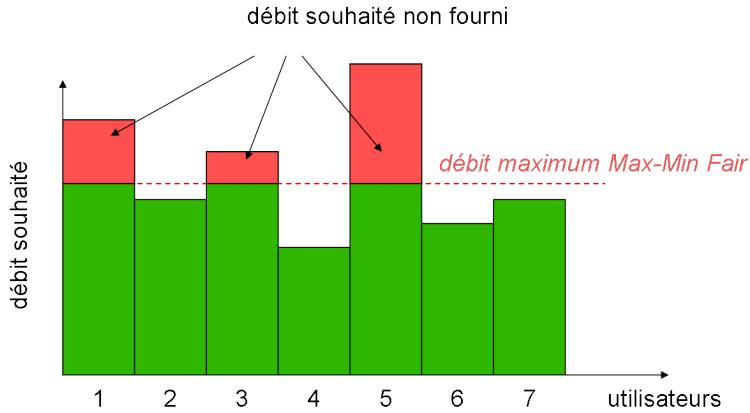


FIG. 2.2 – Allocation Max-Min Fair.

dans le cas où tous les utilisateurs auraient les mêmes besoins, l’ordonnancement Round Robin équivaudrait au Max-Min Fair).

Une partie de la communauté scientifique considère qu’un qualité de service telle qu’obtenue avec le Max-Min Fair est satisfaisante. Cependant, nous pensons que cette vision, pertinente au début de l’internet, est aujourd’hui obsolète. Il n’est en effet pas envisageable à l’heure actuelle, où les applications multimédia sont de plus en plus rentables et plébiscitées par le public et les opérateurs, de continuer à satisfaire en priorité les utilisateurs qui demandent peu, tirant au final la QoS vers le bas. D’une part, nous pensons que ce n’est pas équitable et d’autre part, nous verrons que cela ne fournit pas une utilisation efficace de la bande passante. En effet, n’accorder à un utilisateur qu’une partie du débit qu’il demande conduit généralement à une impossibilité pour lui d’accéder correctement au service demandé. Cela amène à s’interroger sur l’intérêt réel de lui attribuer des URs inutilement puisqu’elles seront au final gâchées et ne déboucheront sur aucun service réel. Enfin, il convient d’ajouter que le Max-Min Fair n’est pas opportuniste et qu’il offre donc par nature de faibles débits. Compte tenu de ce qui précède, nous ne retiendrons pas dans cette thèse cet ordonnanceur comme l’un des plus efficaces malgré la réputation dont il jouit généralement.

2.2.3 Le Weighted Fair Queuing (WFQ)

Le *Weighted Fair Queuing* (WFQ) [60, 61] est une amélioration de l’algorithme *Fair Queuing* (FQ). Cet algorithme utilise un système de poids qui permet de privilégier certains flux en leur accordant davantage de bande passante. Cela permet de contrôler la qualité de service et de gérer, même si ce n’est que d’une manière rudimentaire, la différenciation de service. Ainsi, le WFQ peut garantir différents débits entre chaque utilisateur et assurer une

potentielle équité en termes de satisfaction des contraintes de qualité de service de chaque utilisateur. Si l'on considère toujours les trois niveaux d'équité décrits en introduction, l'équité de niveau 3 est ici en partie atteinte.

2.2.4 Bilan

Même si le Max-Min Fair et le Fair Queuing ne font qu'uniformiser les débits des utilisateurs, l'équité entre mobiles est améliorée par rapport aux ordonnanceurs classiques. Le Weighted Fair Queuing, quant à lui, permet de différencier les flux et donc, en les priorisant de manière adéquate d'atteindre une satisfaction globale plus élevée. En revanche, leur défaut commun et non négligeable est qu'ils ne tiennent toujours pas compte des états des liens qui séparent la station de base des utilisateurs. Par conséquent, des URs sont régulièrement allouées à des utilisateurs qui ne peuvent pas bien les exploiter à cause de mauvaises conditions physiques (liées, entre autres, aux atténuations multi-trajets). Cela conduit inévitablement à un gâchis de bande passante et donc à une perte significative de débit pour le système, critère de performance pourtant essentiel dans les réseaux d'accès.

2.3 Les algorithmes opportunistes

Les algorithmes précédents ne tirent pas le meilleur parti de la bande passante et offrent un débit global du système très éloigné des limites théoriques. De nombreux travaux ont donc cherché à corriger ce problème crucial pour les réseaux actuels et futurs. Ces derniers ont aboutis à la conclusion qu'une approche inter-couches « MAC/PHY » est une solution particulièrement adaptée pour réaliser un usage optimal des ressources radio [20, 21, 62–64]. Bâties sur cette approche inter-couches, de nouveaux ordonnanceurs particulièrement efficaces sont ainsi apparus : les ordonnanceurs opportunistes.

Principalement, deux classes d'algorithmes ont émergés : le Maximum Signal-to-Noise Ratio (MaxSNR) et le Proportional Fair (PF). Tirant profit de la diversité fréquentielle et multi-utilisateurs pour allouer prioritairement les ressources aux mobiles qui ont les conditions de transmission/réception les plus favorables (le meilleur rapport signal/bruit), ils maximisent les débits des réseaux OFDM.

2.3.1 Le Maximum Signal-to-Noise Ratio (MaxSNR)

De nombreux ordonnanceurs très performants sont dérivés du MaxSNR (également connu sous le nom de Maximum Carrier to Interference ratio (MaxC/I)). Avec le MaxSNR, la priorité est donnée à l'utilisateur actif qui a le plus grand rapport signal à bruit (signal-to-noise ratio (SNR)) [19–21].

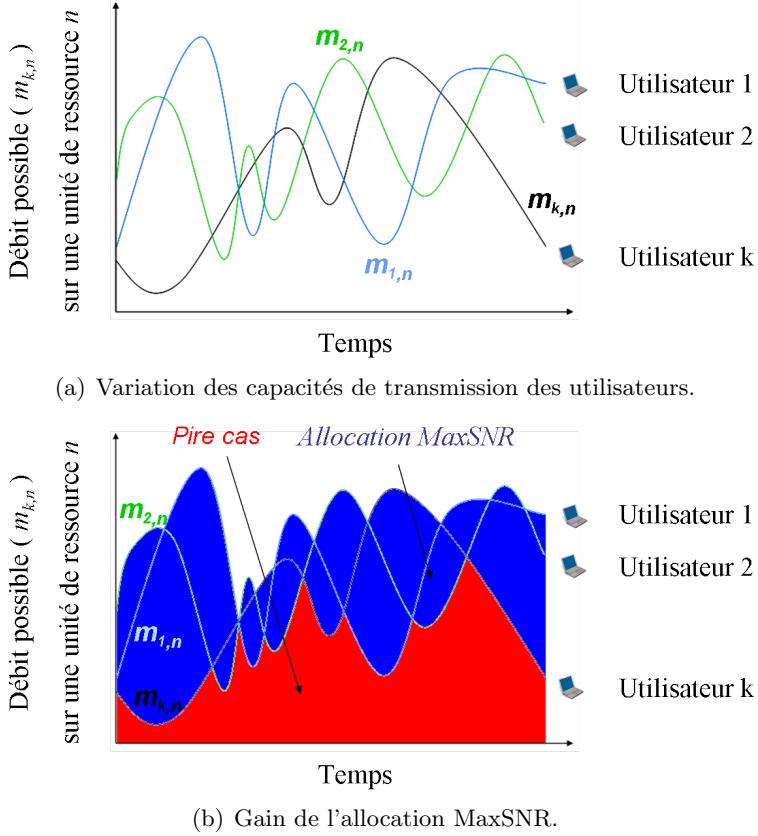


FIG. 2.3 – Maximisation du débit via une allocation MaxSNR.

Si l'on désigne par $m_{k,n}$ le nombre maximum de bits qui peut être transmis durant un intervalle de temps sur la sous-porteuse n si on l'alloue au mobile k , l'allocation MaxSNR consiste à allouer l'unité de ressource « intervalle de temps considéré, sous-porteuse n » à l'utilisateur j qui a le plus grand $m_{k,n}$ avec :

$$j = \text{argmax}_k (m_{k,n}), \quad k = 1, \dots, K, \quad (2.1)$$

où K désigne le nombre total d'utilisateurs actifs.

L'allocation fournie par l'algorithme MaxSNR est illustrée par la figure 2.3. Sur la figure 2.3(a) sont représentées, pour une UR donnée, les variations dans le temps des débits possibles ($m_{k,n}$) pour trois utilisateurs différents. La zone rouge de la figure 2.3(b) représente le débit obtenu dans le pire cas. La zone bleue, additionnée à la zone rouge représente quant à elle le débit obtenu avec une allocation MaxSNR. Profitant de la diversité multi-utilisateurs et fréquentielle, l'ordonnancement MaxSNR alloue constamment la ressource radio à l'utilisateur qui a la meilleure efficacité spectrale et par conséquent qui permettra d'obtenir le meilleur débit sur chaque UR. En adaptant dynamiquement la modulation, il

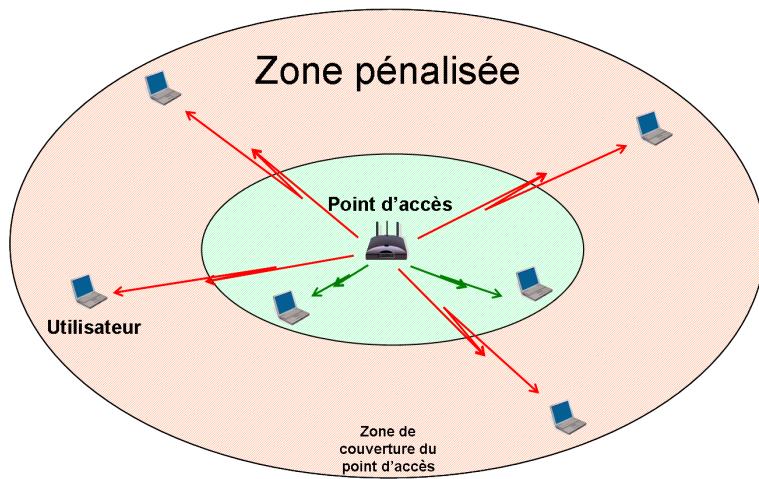


FIG. 2.4 – Problème d'inéquité induit par le positionnement géographique des utilisateurs.

permet ainsi de faire un usage extrêmement efficace de la ressource radio et de se rapprocher de la limite de capacité de Shannon ce qui lui permet d'accroître très fortement le débit du système.

Cependant, un effet négatif de cette allocation est que les utilisateurs proches du point d'accès ont toujours une priorité disproportionnée sur les utilisateurs plus éloignés. Bénéficiant d'une atténuation de propagation plus faible et donc d'un SNR plus grand, les mobiles proches seront souvent, voire toujours, sélectionnés avant les mobiles éloignés qui ne se verront alors allouer que les résidus. Le prix de la maximisation du débit via le MaxSNR est donc une accentuation de l'inéquité du système. La figure 2.4 illustre ce phénomène : dans la zone verte les mobiles accèdent à la ressource radio en priorité et voient leurs besoins comblés, dans la zone rouge en revanche les mobiles sont « pénalisés » et ne se voient attribuer que la bande passante résiduelle une fois les mobiles de la zone « prioritaire » servis. Lorsque le réseau est congestionné, il est d'ailleurs fréquent que les mobiles éloignés n'accèdent plus du tout à la ressource radio. Cette exemple simple met en exergue qu'avec le MaxSNR il est impossible de garantir une qualité de service même minime puisque cette dernière va exclusivement ou presque dépendre de la position relative des mobiles. De plus, le MaxSNR présente un autre inconvénient : il ne tient pas compte des besoins des utilisateurs lors de l'attribution des priorités [65]. Etant incapable d'assurer une quelconque différenciation de service, l'intérêt de son utilisation dans les contextes multimédia reste donc limité. Pour ces raisons, le MaxSNR est actuellement considéré comme l'ordonnateur le plus efficace du point de vue de la maximisation du débit mais également le moins équitable.

2.3.2 Le Proportional Fair (PF)

L'ordonnancement Proportional Fair a récemment été proposé et permet d'incorporer un certain degré d'équité tout en gardant les bénéfices du MaxSNR en termes de maximisation du débit. Reconnu par la communauté scientifique pour sa simplicité et ses très bonnes performances, de très nombreux travaux de recherche portent sur cet ordonnanceur, que ce soit dans le développement de nouveaux algorithmes basés sur le PF [22–27, 66–80] ou dans l'étude de leurs caractéristiques et de leurs performances [81–86]. Le principe du Proportional Fair est d'allouer un intervalle de temps de la sous-porteuse n à l'utilisateur j qui a les conditions de transmission les plus favorables par rapport à sa moyenne avec :

$$j = \operatorname{argmax}_k \left(\frac{m_{k,n}}{M_{k,n}} \right), \quad k = 1, \dots, K, \quad (2.2)$$

où $M_{k,n}$ est la moyenne dans le temps des valeurs de $m_{k,n}$.

Grâce à cette stratégie d'allocation, les mobiles ne sont sélectionnés que lorsqu'ils bénéficient de conditions radio exceptionnellement bonnes et qu'ils sont par conséquent les plus aptes à tirer le meilleur profit des URs en termes de débit. Ceci permet d'atteindre une très haute efficacité spectrale.

De plus, à courte échelle de temps, la variation de l'état des liens due à l'affaiblissement de propagation est négligeable puisque chaque utilisateur peut être considéré comme statique. L'atténuation du signal et la variation des valeurs des $m_{k,n}$ sont donc principalement causées par les perturbations multi-trajets. Comme ces dernières sont statistiquement similaires pour tous les utilisateurs, le Proportional Fair alloue au final une part égale de bande passante à tous les mobiles comme le ferait le Round Robin, avec cette fois-ci, un débit bien plus élevé. Ainsi, une même quantité d'unités de ressource est allouée à tous les utilisateurs quelles que soient leurs positions et l'équité assurée avec le Proportional Fair est de niveau 1, ce qui constitue une grande avancée face au MaxSNR.

Cependant, un inconvénient majeur demeure. Comme les utilisateurs éloignés du point d'accès ont en moyenne une plus faible efficacité spectrale que les utilisateurs plus proches, tous les mobiles ne bénéficient pas du même débit. Comme avec le Round Robin, l'équité de niveau 2 n'est donc pas atteinte. De plus, comme le MaxSNR, le Proportional Fair ne prend pas en compte les contraintes de retard maximum à ne pas dépasser pour les applications, les débits souhaités, etc. Ne gérant pas la différenciation de service, il est impossible de traiter les mobiles ayant des trafics hétérogènes, comportant des débits variables et des contraintes de qualité de services spécifiques. Le PF n'est donc pas bien adapté à la gestion des services multimédia [29, 81, 82, 87].

En conclusion, malgré ces limites, le PF apporte une réelle amélioration en termes d'équité en réduisant l'ampleur du problème par rapport au MaxSNR. Grâce à l'utilisation de l'approche opportuniste, le haut débit obtenu dans le système est comparable au

MaxSNR et l'équité équivalente à celle procurée par le RR. Combinant les avantages des algorithmes classiques et du MaxSNR, le Proportional Fair apparaît donc comme la meilleure stratégie d'allocation de ressource actuelle pour les réseaux sans fil.

Evolutions :

Rapidement reconnu pour ces performances et sa simplicité, de nombreux algorithmes dérivés du PF ont donc naturellement vu le jour [22]. Parmi ces travaux [23–27, 66–80], le *Multimedia Adaptive OFDM Proportional Fair* (MAOPF) [27] propose une évolution intéressante du PF en permettant de prendre en compte la quantité de données à transmettre/recevoir par chaque flux dans le processus d'allocation. Le principe est de répartir la bande passante entre les utilisateurs de manière proportionnelle à leur débit souhaité. La sous-porteuse n est alors allouée, pour l'intervalle de temps considéré, au mobile j avec :

$$j = \operatorname{argmax}_k \left(\frac{m_{k,n} \times R_k}{M_{k,n}} \right), \quad k = 1, \dots, K, \quad (2.3)$$

où R_k désigne le débit souhaité par l'utilisateur k .

Grâce à cette évolution, établir une différenciation de service en fonction des débits souhaités est maintenant possible. Malheureusement, bien que cela permette la coexistence d'applications de débits différents, les contraintes de qualité de service (taux de perte de paquets, retard maximum, etc.) ne sont toujours pas considérées. La différenciation de service est donc incomplète. De plus, le problème d'inéquité entre mobiles situés à différentes distances du point d'accès persiste, ce qui minimise l'intérêt de cette amélioration. En dépit de ces lacunes, ces travaux montrent cependant qu'il est possible d'améliorer les algorithmes opportunistes afin de mieux gérer les flux multimédia en différenciant les flux de services et en procurant davantage d'équité et de qualité de service sans pour autant réduire le débit global du système.

2.3.3 Algorithmes hybrides MaxSNR/PF

D'une manière générale, les allocations de ressources opportunistes actuelles consistent à allouer la sous-porteuse n , pour un intervalle de temps fixé, à l'utilisateur j avec :

$$j = \operatorname{argmax}_k \left(\frac{m_{k,n}^\alpha}{M_{k,n}^\beta} \right), \quad k = 1, \dots, K, \quad (2.4)$$

où le paramètre α permet d'avoir une allocation plus ou moins opportuniste et β permet d'apporter plus ou moins d'équité.

Lorsque $\alpha = 0$ et $\beta = 0$, l'algorithme est équivalent au Round Robin et à l'accès aléatoire. En effet, chaque mobile se voit attribuer la même priorité. Tous les mobiles sont

donc servis aussi souvent les uns que les autres sans se soucier de leur capacité à exploiter efficacement la ressource. Lorsque $\alpha = 1$ et $\beta = 0$, l'allocation est celle du MaxSNR. Seuls les utilisateurs qui ont les meilleures conditions de transmission sont servis, maximisant ainsi le débit. Enfin, lorsque $\alpha = 1$ et $\beta = 1$, l'allocation obtenue est celle du Proportional Fair qui combine à la fois les avantages du Round Robin et du MaxSNR. D'une manière générale, plus α est grand, plus l'allocation est opportuniste ; plus β est grand, plus l'allocation opportuniste est « tempérée » ce qui permet d'accroître l'équité du système.

2.3.4 Autres algorithmes opportunistes hybrides

De nombreuses méthodes originales permettent d'aboutir à une allocation plus ou moins opportuniste tout en permettant d'incorporer un certain degré d'équité dans le réseau. [88] et [89] en sont deux exemples. Ils tentent de réaliser un compromis entre une allocation classique et opportuniste. La méthode consiste à présélectionner un sous-groupe d'utilisateurs de manière opportuniste, en fonction de leurs conditions radio. La ressource est allouée en Round Robin uniquement entre les mobiles du sous-groupe ainsi présélectionné. Cependant, au vu des résultats constatés, la présélection en sous-groupes conduit à une allocation sous-optimale du point de vue de la maximisation du débit global. Le débit global obtenu reste donc bien plus faible que celui fourni par le MaxSNR ou le PF et le gain réel en termes d'équité n'est quant à lui pas significatif.

2.3.5 Bilan et discussion

Comme nous l'avons vu précédemment, les algorithmes conçus pour les réseaux filaires ne prennent pas en compte les spécificités des transmissions sans fil. En comparaison, les algorithmes opportunistes d'allocation de ressources qui maximisent le débit global du réseau sont particulièrement efficaces. À titre d'exemple, les études de performances montrent généralement qu'en utilisant ces derniers, les débits atteignables peuvent facilement passer du simple au double.

Cependant, il est important de comprendre que le gain de performances est procuré par la possibilité de choisir entre différents utilisateurs lors de l'allocation d'une unité de ressource. On exploite ici la « diversité multi-utilisateurs » [90–100].

La figure 2.3 illustre ce besoin crucial des ordonnanceurs opportunistes à disposer d'une grande diversité multi-utilisateurs. Nous pouvons y voir clairement que, plus la diversité multi-utilisateurs est élevée, plus le choix entre mobiles lors de l'allocation de ressource est important et par conséquent, plus le débit pourra potentiellement être augmenté. À l'inverse, sans cette diversité multi-utilisateurs, les ordonnanceurs opportunistes sont privés de choix et offrent le même débit que tout autre ordonnanceur classique. Ce dernier point

explique pourquoi les ordonnanceurs opportunistes sont toujours utilisés dans un contexte multi-utilisateurs.

2.4 Conclusion

Le tableau ci-dessous tente de résumer le niveau de performance des ordonnanceurs les plus connus en termes de maximisation du débit, d'apport d'équité, de différenciation de service et de simplicité d'implémentation. Le premier critère est essentiel pour accepter les utilisateurs dans le réseau avec succès. Le deuxième et le troisième sont nécessaires pour garantir une qualité de service. Le quatrième est quant à lui un élément clef du succès des ordonnanceurs.

Les différents ordonnanceurs sont notés¹ dans chaque domaine de 0 à 3 :

- Pour le débit, la différenciation de service et la simplicité : 0 représente le plus faible niveau et 3 représente l'objectif maximum atteignable vers lequel il est souhaitable de tendre.
- Pour l'équité, on représentera les paliers définis en introduction : 0 signifie qu'il n'y a aucune équité, 1 correspond à des unités de ressource distribuées d'une manière homogène, 2 signifie que les débits fournis aux utilisateurs sont équivalents, 2,5 note les ordonnanceurs qui assurent une relative équité aux utilisateurs, le 3 est réservé à d'éventuels algorithmes assurant une égale satisfaction entre mobiles quel que soit le contexte. Cela sous-entend que les ordonnanceurs notés 3 différencient les services.

TAB. 2.1 – Classification qualitative des ordonnanceurs.

Ordonnanceurs	RR	RA	FQ	Max-Min Fair	WFQ	MaxSNR	PF
Débit	0	0	0	0	0	3	3
Équité	1	1	2	2	2.5	0	1
Différenciation de service	0	0	0	0	1	0	0
Simplicité	3	3	2	2	2	2	2

¹Les notes attribuées sont données à titre indicatif. Leur objet est de permettre de classer un algorithme comme appartenant à un groupe d'ordonnanceurs de manière rapide, et non de pouvoir les comparer point par point avec précision. En effet, il est très difficile de donner un classement précis et quantitatif des ordonnanceurs sur des aspects comme l'équité, un ordonneur pouvant être plus ou moins équitable qu'un autre et vice-versa, en fonction des contextes.

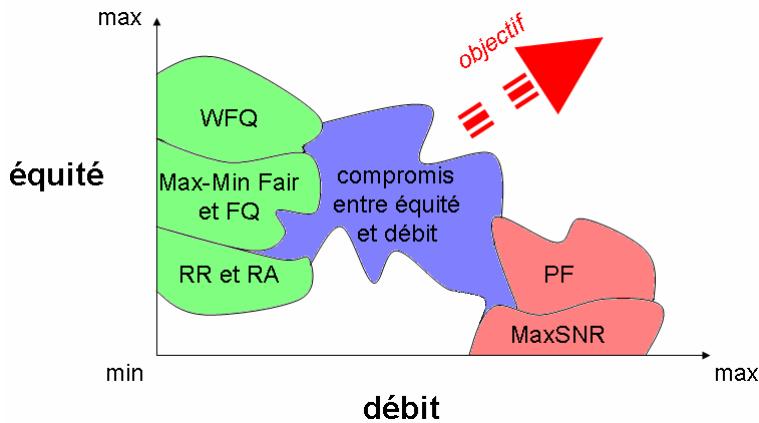


FIG. 2.5 – Compromis entre équité et maximisation du débit.

L’analyse de ce tableau nous permet de facilement regrouper et classer les ordonneurs en trois grandes catégories :

- les ordonneurs simples à implémenter mais peu équitables et qui ne maximisent pas le débit (RR et RA),
- les ordonneurs relativement équitables mais qui ne maximisent pas le débit (FQ, Max-Min Fair et WFQ),
- les ordonneurs qui maximisent le débit mais qui sont relativement inéquitables (MaxSNR, PF).

Il est intéressant de constater que la différenciation de service, objectif pourtant primordial pour le support des services multimédia, reste à atteindre. De plus, haut débit et équité, semblent être deux objectifs difficilement conciliaires (comme illustré dans la figure 2.5). En effet, l’idée largement répandue est qu’un compromis est la seule voie possible entre ces deux objectifs de performance : si le débit est maximisé, alors l’équité s’en trouve dégradée et vice versa. Cependant, dans les chapitres 4 et 5, nous verrons que c’est une fausse croyance et que la recherche conjointe de ces deux objectifs mérite d’être menée. En effet, au cours de nos travaux, nous avons découvert qu’il est possible par une approche inter-couches de maximiser le débit global tout en assurant une grande équité et cela en partie via une différenciation de service efficace.

Chapitre 3

Nouvel Outil de Mesure de la QoS

3.1	Introduction	42
3.1.1	Critères génériques de performance des ordonnanceurs	42
3.1.2	Evaluation de l'équité	43
3.1.3	Nécessité d'un nouvel outil de mesure	43
3.2	Le <i>Packet Delay Outage Ratio</i> (PDOR)	44
3.3	Conclusion	46

3.1 Introduction

Avant de proposer de nouveaux ordonnanceurs, nos travaux ont débuté par une réflexion approfondie sur les objectifs à viser dans l'allocation de ressources OFDM et sur la manière optimale de vérifier dans quelle mesure ils sont éventuellement atteints. Ce chapitre traite en particulier de la question des critères d'évaluation de performances à retenir pour une classification juste et efficace des ordonnanceurs modernes. Notre étude a mis en exergue que beaucoup d'ordonnanceurs sont évalués sur des critères inadaptés qui rendent leur comparaison difficile. Pour régler ce problème, nous avons choisi de définir, d'une manière claire, pour la suite de nos travaux, les critères de performance pertinents permettant de juger correctement de la valeur des ordonnanceurs. Dans ce cadre nous présenterons un nouveau moyen de mesure efficace de la QoS.

3.1.1 Critères génériques de performance des ordonnanceurs

D'innombrables travaux de recherche ont été produits ces dernières décennies pour proposer des ordonnanceurs efficaces, compatibles avec les réseaux sans fil OFDM. Il devient par conséquent primordial de pouvoir classer ces ordonnanceurs afin de déterminer lesquels implémenter dans les réseaux présents et futurs.

La difficulté rencontrée lors de ce classement est que la plupart des algorithmes excellent dans un contexte précis. Ces derniers sont bien souvent conçus en visant différents objectifs (tels que la simplicité d'implémentation, la maximisation du débit, ou bien l'apport d'une certaine équité, etc.) et leurs performances sont généralement données par leurs concepteurs en fonction de critères distincts qui dépendent des spécificités de chaque algorithme. De ce fait, selon la ou les métrique(s) considérée(s) pour l'analyse des performances, la hiérarchisation des ordonnanceurs est bien souvent différente d'une évaluation à l'autre, ce qui complique fortement le travail de comparaison.

Dans ce contexte, nous pensons que pour réussir une classification pertinente, il faut tout d'abord définir de manière précise quels sont les critères de performance essentiels dans les réseaux sans fil OFDM permettant de mesurer l'efficacité d'un ordonnanceur. Deux critères de performance majeurs peuvent être considérés [14] :

- **la maximisation de la capacité totale du système**, qui détermine le nombre d'utilisateurs admissibles dans le réseau,
- **l'optimisation de l'équité au sens large**, qui, liée à la possibilité de différencier les services, permet d'apporter une véritable qualité de service durable aux utilisateurs quel que soit le contexte.

3.1.2 Evaluation de l'équité

Les critères de performance majeurs étant définis, la question est de savoir à présent comment évaluer s'ils sont atteints. Si l'aptitude des ordonnanceurs à maximiser le débit total du système est facile à mesurer via une analyse de la somme des débits de transmission de chaque mobile, en revanche, mesurer l'équité pose de gros problèmes. En effet, l'équité est un terme abstrait, difficile à définir, et par conséquent très difficilement mesurable.

Puisqu'il existe plusieurs niveaux d'équité (cf. introduction), il est évident qu'une comparaison de l'équité procurée par deux ordonnanceurs doit obligatoirement se faire sur un même niveau afin que celle-ci se révèle juste. Dans le contexte actuel, l'essor des nouvelles technologies a provoqué l'apparition dans les réseaux sans fil d'un grand nombre d'applications aux besoins radicalement différents tels que la voix sur IP, la vidéo-conférence, l'envoi de courriels, l'envoi de fichiers, etc. Offrir une même quantité de ressources, un même débit ou un même délai d'attente à des applications aussi hétérogènes n'a aujourd'hui plus beaucoup de sens. Seul le fait de procurer un même degré de satisfaction aux utilisateurs d'un réseau, quelles que soient les applications utilisées, garde une réelle signification en terme d'équité. Une situation où des mobiles seraient tous satisfaits à un même degré correspondrait donc à la plus haute équité possible. En conséquence, nous avons décidé de mesurer l'équité procurée dans un système via des estimations du niveau de satisfaction de chaque utilisateur (i.e. l'équité de niveau 3).

3.1.3 Nécessité d'un nouvel outil de mesure

Le degré de satisfaction d'un utilisateur ou d'une application est en relation directe avec le niveau de qualité de service qui leur est assuré. Afin d'évaluer le degré de satisfaction des utilisateurs et donc l'équité du système, une nouvelle question essentielle se pose : comment mesurer la QoS procurée à différentes applications de manière simple et fiable quels que soient les scénarii étudiés ? Plusieurs mesures répandues pourraient sembler, à première vue, utiles pour répondre à cette question :

- On peut tout d'abord penser à la mesure des débits fournis à chaque utilisateur. Cependant, obtenir un même débit pour deux mobiles ne garantit absolument pas qu'ils obtiendront pour autant le même niveau de qualité de service et donc le même niveau de satisfaction. Tout dépend en réalité de leurs besoins ainsi que de la variabilité de leur flux. Même si l'on compare les débits fournis aux besoins de chaque utilisateur, cela ne permettra toujours pas d'estimer la satisfaction des mobiles avec exactitude. Cette estimation ne serait en effet que très approximative puisque la QoS des mobiles dépend de bien d'autres critères comme les BERs, le retard des paquets, la gigue, etc. Bien que souvent utilisé [81, 88, 101] parce que facile d'emploi et connue, la mesure

des différents débits fournis ne suffit donc pas, seule, à déterminer efficacement le niveau de QoS (donc de satisfaction et d'équité) fourni aux mobiles.

- Afin de pallier ce manque d'informations, il est logique de vouloir s'appuyer sur des mesures comme le retard moyen des paquets de chaque utilisateur ou la gigue. Malheureusement, là encore et bien que courante dans la littérature, l'utilisation de telles mesures s'avère rapidement inappropriée pour évaluer le degré de QoS effectif fourni par un système. Pour donner un exemple simple, un retard moyen de 100 ms pour des paquets n'a pas la même conséquence sur la qualité de service apportée à un utilisateur suivant qu'il s'agit d'une application *streaming* ou d'une application « voix sur IP ». Dans le premier cas, l'utilisateur sera très certainement satisfait, alors que dans le second, le service risque de subir de très fortes perturbations. La mesure seule du retard des paquets conclurait donc sur une fausse affirmation : les deux mobiles subissant un même retard moyen de paquets, ils auraient la même QoS, le même degré de satisfaction et donc le système serait équitable ! Dans un contexte multi-utilisateurs et multimédia, des informations comme le retard et la gigue sont donc insuffisantes pour évaluer la QoS. Elles sont donc quasiment inexploitables pour quantifier une éventuelle équité apportée par un ordonnanceur.

Combiner débit fourni, débit souhaité, retard subi, retard maximum admissible, BER subi, BER requis, etc. donnerait enfin une information pertinente sur le niveau de qualité de service fourni à plusieurs flux d'applications différentes et de ce fait, permettrait d'évaluer et de comparer correctement l'équité procurée par différents ordonnanceurs sur une même échelle de valeur. Cependant, tous ces paramètres forment un éventail complexe à obtenir, interpréter et exploiter, ces derniers n'ayant pas forcément tous la même influence sur la QoS selon les contextes. Pour résoudre ce problème, la solution serait de trouver un outil unique de mesure de la QoS capable d'estimer, de manière simple et générique, la proportion de paquets qui respectent ou non les contraintes fixées en amont par les applications quelles qu'elles soient.

3.2 Le *Packet Delay Outage Ratio* (PDOR)

Notre première contribution est de proposer une solution à ce problème d'évaluation. L'objectif visé est d'estimer de manière générique et « sur une même échelle de valeur » la qualité de service fournie à différents types d'utilisateurs de différents services multimédia et cela quel que soit les scénarios étudiés. Cela permettra de comparer les niveaux de satisfaction d'utilisateurs d'applications différentes sur le réseau et par là même d'évaluer le niveau d'équité qui règne dans le réseau.

Cette solution est apportée par la proposition d'un nouvel outil de mesure de la qualité de service dans les réseaux multimédia : le *Packet Delay Outage Ratio* (PDOR). Contrairement aux mesures précédentes, complexes à interpréter et surtout incomplètes sur le plan de la qualité de l'information que l'on peut en tirer, le PDOR permet d'évaluer d'une manière simple et juste la capacité des ordonnanceurs à supporter efficacement l'utilisation de services multimédia dans les réseaux sans fil.

Pour mesurer la qualité de service fournie à des services multimédia variés et hétérogènes dans une approche générique, il est nécessaire de définir quelques termes et hypothèses :

- La notion de « flux » est définie comme un écoulement de trafic, dans un sens de transmission donné, auquel sont associées des contraintes de qualité de service. Un mobile peut avoir de multiples flux dans les deux sens, montant et descendant. Chaque flux possède sa propre file d'attente. Par la suite, le terme k est utilisé pour désigner un flux donné parmi l'ensemble des flux à gérer.
- Le profil de qualité de service d'un flux est défini par l'ensemble des paramètres qui caractérisent les contraintes à respecter. Ces paramètres sont principalement : l'intégrité des données et le retard maximum toléré pour les paquets. Par la suite, le taux d'erreur par bit acceptable sera spécifié par le paramètre BER_{target} et le retard maximum toléré pour le flux k , par le paramètre T_k .
- Les flux de trafic sont organisés au niveau MAC, en blocs de bits de taille constante que nous appellerons paquets.
- Le retard d'un paquet est défini comme le temps qui sépare l'arrivée de celui-ci dans la file d'attente et son temps de réception par le mobile (ou le point d'accès). Ce retard peut être considéré comme égal au temps d'attente dans la file d'attente, le temps de transmission, le temps d'accès au médium et le temps de propagation étant négligeables¹.

Considérant les outils de mesure relatifs au retard de paquets et les informations qu'ils nous apportent sur la qualité de service fournie aux utilisateurs, le plus utile et pertinent n'est pas le retard moyen des paquets pour chaque flux comme vu précédemment mais plutôt le pourcentage de paquets délivrés trop tard pour satisfaire l'application. En effet, c'est cette dernière valeur qui permet réellement de savoir si un mobile reçoit ses paquets à temps ou non et donc s'il est satisfait ou non.

¹Nous avons considéré dans cette thèse une approche totalement centralisée de l'accès au medium. Les paquets à transmettre sont donc mis en attente dans le point d'accès ou dans le mobile jusqu'à ce que les unités de ressources nécessaires à leur transmission leur soient allouées par l'ordonnanceur. Une fois cette ressource allouée, l'accès au médium est garanti dans la prochaine trame. Cet accès peut donc être considéré comme immédiat en comparaison du temps qui s'écoule entre la demande de ressource et l'allocation qui représente l'essentiel du retard d'un paquet.

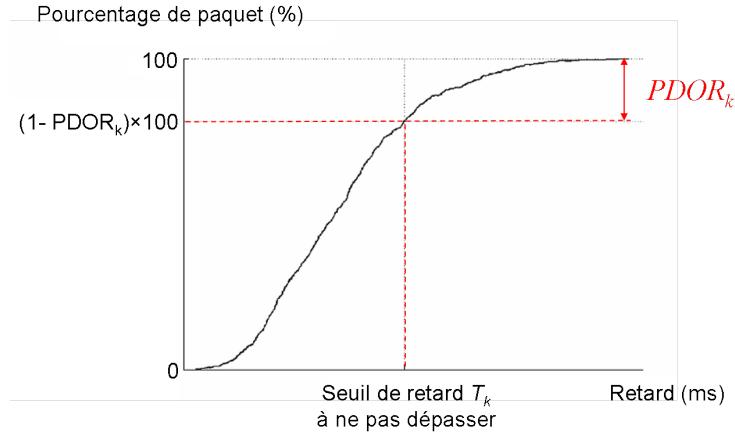


FIG. 3.1 – Exemple de fonction de répartition des temps de retard des paquets d'un flux et illustration du PDOR.

Nous définissons pour cela le concept d' « excès de retard » nommé par la suite « *delay outage* ». Un flux k est en *delay outage* lorsqu'un de ses paquets au moins subit un retard plus grand que le seuil de tolérance T_k défini par l'application considérée. Cependant, l'important n'est pas de savoir si un flux est en *delay outage* ou non (le retard d'un seul paquet ayant peu d'impact sur la QoS), mais plutôt de connaître l'ampleur de ce *delay outage*. A cet effet nous définissons également le taux de paquets arrivés hors délai d'un flux k par le terme « *Packet Delay Outage Ratio* » ($PDOR_k$) (figure 3.1).

La valeur de PDOR est mise à jour tout au long de la vie de chaque flux. À chaque transmission de paquets du flux k , le nombre total de paquets qui ont un retard supérieur au retard maximum toléré T_k , divisé par le nombre total de paquets transmis par ce flux depuis le début de la connexion est calculé. Le *Packet Delay Outage Ratio target* ($PDOR_{target}$) est le pourcentage maximum de paquets qui peut être délivré après le seuil de tolérance T_k sans gêner l'application. Cela caractérise les contraintes de retard d'un flux d'une manière précise et générique.

Afin d'apporter une grande qualité de service, les ordonnanceurs doivent réguler les valeurs de PDOR subies tout au long de la vie des flux de sorte que les valeurs de PDOR restent inférieures aux $PDOR_{target}$. C'est en effet sous cette dernière condition que sera assuré, au final, la satisfaction ou non des flux.

3.3 Conclusion

Grâce aux informations sur les états des liens (CSI), les débits accordés à chaque flux peuvent facilement être calculés de manière à respecter les BER_{target} de chacun. Aussi, si

l'on considère que les ordonnanceurs délivrent les paquets en respectant le BER_{target} de chaque flux, la qualité de service procurée aux différents utilisateurs par un ordonnanceur peut être mesurée simplement et efficacement par le nouvel outil de mesure que nous avons introduit : le PDOR. En effet, quels que soient les débits requis par chaque flux et les seuils de retard à ne pas dépasser par les paquets de chaque application, le PDOR permet de savoir de manière simple si oui ou non l'utilisateur est satisfait ($PDOR_k \leq PDOR_{target}$) et dans quelle mesure (le degré de satisfaction d'un utilisateur étant inversement proportionnel à la valeur de son PDOR).

Quel que soit le contexte, les flux considérés et leurs contraintes de QoS, les PDORs représentent toujours le ratio de paquets arrivés à temps. Les valeurs obtenues sont donc assimilables aux pourcentages de réussite des transmissions et donc au niveau de QoS et de satisfaction de chaque flux.

Pour bien comprendre comment la qualité de service fournie à deux utilisateurs d'applications complètement différentes peut être mesurée et comparée avec une seule « métrique », reprenons l'exemple énoncé en début de chapitre : un retard de 100 ms pour un paquet n'a pas le même impact sur la qualité de service apportée à un mobile selon que l'on considère un paquet « *streaming* » ou « *voix sur IP* ». Comme nous l'avons vu précédemment, la mesure seule du retard moyen des paquets déboucherait sur une conclusion erronée. En revanche, les PDORs diffèrent considérablement pour les deux flux et permettent de juger correctement du niveau de qualité de service et de satisfaction. Contrairement au second flux, les paquets du premier sont reçus avant le seuil limite. Le PDOR est alors faible et le niveau de satisfaction élevé.

Des PDORs différents apportent de réelles informations sur la qualité de service fournie à l'utilisateur et cela sans avoir besoin de considérer le type d'application utilisée ou tout autre type de paramètre. Un PDOR de 10 % signifie qu'un dizième des paquets sont arrivés hors délai et donc que l'application a obtenu une qualité de service plutôt dégradée. Si ce PDOR mesuré est supérieur au $PDOR_{target}$, on peut alors aisément considérer que l'utilisateur est insatisfait. Cette information est à la fois qualitative et quantitative. Grâce à la comparaison du $PDOR_{target}$ et du $PDOR_k$ de chaque flux, il est alors possible d'estimer les taux de satisfaction des utilisateurs et les comparer. Cela permet ainsi de mesurer efficacement l'équité fournie par les ordonnanceurs dans le réseau même si celui-ci gère des utilisateurs à flux fortement hétérogènes, ce qui ne peut pas être fait avec des outils de mesure conventionnels comme le débit ou le retard moyen des paquets.

Voix sur IP, vidéoconférence ou transfert de fichiers, chacune de ces applications a des contraintes d'erreur par bits, des besoins en termes de débit et des valeurs de seuil de tolérance T_k différents. Pourtant, leurs valeurs de PDORs ont une même signification et représente les niveaux de QoS et donc de satisfaction de chaque mobile du réseau sur une

même échelle de valeur. Evaluer l'équité procurée par les ordonnanceurs est donc désormais possible de manière simple et précise quel que soit le contexte.

Améliorations des Ordonnanceurs Opportunistes Actuels

4.1	Problématique et approche adoptée	52
4.2	Le Fair Maximum Signal-to-Noise Ratio (FMaxSNR)	53
4.3	Le Compensated Proportional Fair (CPF)	55
4.4	Diagramme d'états-transitions du FMaxSNR et du CPF	57
4.5	Avantages	59
4.6	Conclusion et limites	60

4.1 Problématique et approche adoptée

Les algorithmes d’allocation de ressources MaxSNR et PF sont souvent reconnus par la communauté scientifique comme les plus efficaces dans les réseaux sans fil OFDM. Grâce à leur fonctionnement opportuniste, ils tiennent compte des variations des états des liens, maximisent les débits des systèmes dans lesquels ils sont implémentés et permettent ainsi d'accueillir un très grand nombre d'utilisateurs dans le réseau. Cependant, comme évoqué dans les sous-sections 2.3.1 et 2.3.2, cela a un coût : les mobiles éloignés du point d'accès sont systématiquement pénalisés face aux mobiles plus proches, ce en raison de leurs conditions de transmission en moyenne peu favorables (causées par un affaiblissement de propagation important). En effet, offrant des possibilités de débit moindres, ils seront rarement sélectionnés par le MaxSNR et de manière insuffisante par le PF. Or, dans le contexte actuel où les utilisateurs sont de plus en plus mobiles, cet important manque d'équité engendre une inévitable et inacceptable dégradation de la qualité de service.

Dans ce chapitre, nous présentons une solution à ce problème via une amélioration du MaxSNR que nous avons appelée *Fair Maximum Signal-to-Noise Ratio* (FMaxSNR) et une amélioration du PF, dénommée *Compensated Proportional Fair* (CPF). Dans les deux cas, notre objectif est de conserver l'aptitude des algorithmes d'origine à maximiser les débits tout en corrigeant l'inéquité qu'ils induisent. Le principe de cette correction est de continuer à réaliser une allocation opportuniste mais en attribuant plus d'URs aux mobiles éloignés de telle sorte que tous les utilisateurs du réseau bénéficient à terme d'un même débit moyen. Pour ce faire, un nouveau système de priorités a été élaboré pour prendre en compte la position de chaque utilisateur connecté et compenser ainsi, lors de l'allocation de ressources, l'influence néfaste sur l'équité de l'affaiblissement de propagation (*path loss*). La modification des priorités accordées à chaque mobile a pour objet d'émuler une allocation MaxSNR (pour le FMaxSNR) et PF (pour le CPF) où chaque mobile serait virtuellement à une même distance du point d'accès. Cela conduit à allouer les unités de ressource aux mobiles lorsqu'ils bénéficient de leurs meilleures conditions radio (i.e. un affaiblissement lié aux multi-trajets très faible) tout en assurant une équité élevée entre mobiles quelles que soient leurs positions respectives. De cette manière, nous verrons que les nouveaux algorithmes proposés améliorent significativement la qualité de service dans l'ensemble du réseau en procurant une équité de niveau 1 pour le FMaxSNR et de niveau 2 pour le CPF sans nuire à la capacité du système.

Nous présenterons dans le chapitre 6¹ une évaluation de performances étendue qui démontrera que le FMaxSNR et le CPF surpassent largement leur version d'origine en

¹Un autre ordonnanceur est proposé au chapitre 5. Afin de permettre une comparaison claire et sans redondance des performances de toutes nos propositions, nous avons choisi de ne pas présenter une évaluation de performances par ordonnanceur mais plutôt une évaluation globale et synthétique dans un chapitre dédié.

garantissant à la fois haut débit et grande équité sans aucun compromis.

4.2 Le Fair Maximum Signal-to-Noise Ratio (FMaxSNR)

Le plus connu et le plus représentatif des ordonnanceurs opportunistes est le MaxSNR. Celui-ci calcule régulièrement pour l'allocation de ressources le nombre maximum de bits $m_{k,n}$ qui peuvent être transmis pendant un intervalle de temps sur la sous-porteuse n , si elle est assignée au flux k , pour tout k et chaque valeur de n . Il alloue ensuite la sous-porteuse n au flux k pour lequel le paramètre $m_{k,n}$ est le plus grand.

Les $m_{k,n}$ sont calculés comme suit. Notons $P_r(q)$ la puissance reçue nécessaire pour recevoir q bits dans une unité de ressource tout en respectant la cible de taux d'erreur par bit (BER_{target}). Pour une modulation MAQ et un ordre de modulation M ($= 2^q$) sur un canal subissant un évanouissement plat (*flat fading*) [7] :

$$P_r(q) = \frac{2N_0}{3T_s} \left[erfc^{-1} \left(\frac{BER_{target}}{2} \right) \right]^2 (M - 1), \quad (4.1)$$

où T_s est la durée d'un symbole OFDM, $erfc$ est la fonction d'erreur complémentaire et N_0 la densité spectrale de puissance du bruit. Soient $a_{k,n}$ l'atténuation subie sur le canal n par le flux k et P_{max} la puissance maximale de transmission autorisée, nous avons :

$$P_r(q) \leq a_{k,n} P_{max}. \quad (4.2)$$

Considérant une atténuation en espace libre a_k (*path loss*) et une atténuation liée aux multi-trajets $\alpha_{k,n}^2$ (*multipath fading*) [9], le gain du canal s'écrit :

$$a_{k,n} = a_k \times \alpha_{k,n}^2. \quad (4.3)$$

Le nombre de bits maximum $q_{k,n}$ qui pourraient être transmis pour le flux k pendant un intervalle de temps sur la sous-porteuse n tout en respectant la cible de taux d'erreur par bit s'exprime alors :

$$q_{k,n} = \left\lfloor \log_2 \left(1 + \frac{3P_{max} \times T_s \times a_k \times \alpha_{k,n}^2}{2N_0 \left[erfc^{-1} \left(\frac{BER_{target}}{2} \right) \right]^2} \right) \right\rfloor. \quad (4.4)$$

Notons que la valeur a_k dépend uniquement de la distance entre le point d'accès et le mobile propriétaire du flux k et non de la sous-porteuse considérée. $\alpha_{k,n}^2$ représente quant à lui l'affaiblissement lié aux multi-trajets subi par le flux k sur la sous-porteuse n . Ce dernier reste constant sur la durée d'un intervalle de temps. En simulation, $\alpha_{k,n}$ est modélisé par une loi de Rayleigh avec une espérance de 1. En pratique, les valeurs de a_k et $\alpha_{k,n}^2$ sont estimées à l'aide des CSIs.

Les ordres de modulation MAQ étant limités, q appartient à un ensemble fini S égal à $\{0, 2, 4, \dots, q_{max}\}$. Le nombre maximum de bits $m_{k,n}$ qui peuvent donc être réellement transmis pendant un intervalle de temps de la sous-porteuse n si cette UR est allouée au flux k s'exprime donc :

$$m_{k,n} = \max \{q \in S, q \leq q_{k,n}\}. \quad (4.5)$$

L'ordonnanceur MaxSNR alloue la ressource radio au flux pour lequel le paramètre $m_{k,n}$ est le plus grand. Cette stratégie optimise l'efficacité spectrale du système et permet donc une utilisation performante de la bande passante. Cependant, elle donne aussi une priorité absolue aux mobiles proches du point d'accès au détriment de ceux qui sont plus éloignés causant ainsi un grave défaut d'équité dans le réseau. Afin de résoudre ce problème, nous proposons ici une amélioration du MaxSNR appelée *Fair Maximum Signal-to-Noise Ratio* (FMaxSNR) [28]. Il s'agit d'introduire un nouveau paramètre dénommé « *Compensation Factor* » (CF_k) qui permet de transformer le MaxSNR en un algorithme équitable sans nuire à la capacité globale du système. Ce paramètre tient compte de l'influence du *path loss* sur le débit obtenu en moyenne par le flux k :

$$CF_k = \frac{b_{ref}}{b_k}. \quad (4.6)$$

b_{ref} est le nombre de bits de référence qui peuvent être transmis en moyenne sur une sous-porteuse quelconque en considérant une atténuation en espace libre a_{ref} prédéterminée, pour une distance du point d'accès de référence d_{ref} et une atténuation liée aux multi-trajets telle que $\alpha_{k,n}^2 = 1$:

$$b_{ref} = \log_2 \left(1 + \frac{3P_{max} \times T_s \times a_{ref}}{2N_0 \left[\operatorname{erfc}^{-1} \left(\frac{BER_{target}}{2} \right) \right]^2} \right). \quad (4.7)$$

b_k représente la même quantité mais en considérant cette fois-ci la distance réelle d_k qui sépare le mobile propriétaire du flux k et le point d'accès :

$$b_k = \log_2 \left(1 + \frac{3P_{max} \times T_s \times a_{ref} \times \left(\frac{d_{ref}}{d_k} \right)^\beta}{2N_0 \left[\operatorname{erfc}^{-1} \left(\frac{BER_{target}}{2} \right) \right]^2} \right), \quad (4.8)$$

où β est l'exposant associé au *path loss* considéré².

L'ordonnancement FMaxSNR consiste alors à allouer, pour chaque intervalle de temps, la sous-porteuse n au flux k pour lequel le paramètre $F_{k,n}$ est le plus grand :

$$F_{k,n} = m_{k,n} \times CF_k. \quad (4.9)$$

²La valeur de β est à adapter en fonction du modèle d'atténuation (espace libre, environnement urbain...).

Grâce au facteur de compensation CF_k , l'influence négative sur l'équité de l'affaiblissement de propagation est corrigée. En effet, ce paramètre permet de compenser les faibles débits par UR obtenus en moyenne par les mobiles éloignés en augmentant proportionnellement la priorité de leurs flux. Ainsi, il est attribué un même nombre d'URs à chaque utilisateurs et ce quelle que soit leur position respective. Une équité de niveau 1 est donc garantie. De plus, prenant en compte les $m_{k,n}$ dans le processus d'attribution des priorités, les flux sélectionnés restent ceux qui offrent de bonnes capacités de transmission. Nous verrons, section 4.5 puis chapitre 6, que le débit global obtenu pour le système est comparable à celui procuré par le MaxSNR. Notre proposition permet donc de réaliser une allocation non seulement opportuniste mais également équitable qui permet *in fine* d'accroître de manière substantielle la QoS fournie aux utilisateurs du réseau.

4.3 Le Compensated Proportional Fair (CPF)

L'approche décrite ci-dessus est également transposable au PF. Nous proposons donc dans cette section une amélioration du PF appelée *Compensated Proportional Fair* (CPF) [29, 30]. Comme pour le FMaxSNR, une approche inter-couches est adoptée (les équations 4.1 à 4.9 restent donc ici valides).

À chaque allocation et pour chaque intervalle de temps, alors que le MaxSNR alloue la sous-porteuse n au flux k pour lequel le paramètre $m_{k,n}$ est le plus grand, le PF alloue la sous-porteuse n au flux k qui a le plus grand ratio $PF_{k,n}$ défini par :

$$PF_{k,n} = \frac{m_{k,n}}{M_{k,n}}, \quad (4.10)$$

où $M_{k,n}$ est la moyenne dans le temps des valeurs de $m_{k,n}$. Le choix de l'intervalle de temps sur lequel est calculée la moyenne des valeurs de $m_{k,n}$ est un compromis. Il ne doit être ni trop petit, ni trop grand :

- Tout d'abord, il faut rappeler qu'un des objectifs du PF et du CPF est de privilégier à un instant donné le mobile qui a une faible atténuation liée aux multi-trajets via le rapport $m_{k,n}/M_{k,n}$. Afin d'atteindre cet objectif d'allocation, il faut donc que l'intervalle de temps sur lequel est calculé le $M_{k,n}$ soit suffisamment grand pour "lisser" les effets des atténuations liées aux multi-trajets. Sachant que l'état d'un canal peut être considéré comme stable durant 50 millisecondes [39] et donc que les $m_{k,n}$ varient au bout de ce laps de temps, l'intervalle de temps considéré doit impérativement être fixé comme bien supérieur à cette valeur.
- Cependant, il ne faut pas oublier non plus que les sources sont mobiles dans la cellule. Les atténuations de propagation vont donc elles aussi varier au cours du temps et il est impératif que ces variations ne soient pas prises en compte dans le calcul du

$M_{k,n}$ faute de quoi ce ne serait plus le mobile ayant la faible atténuation liée aux multi-trajets qui serait avantagé mais le mobile ayant aussi la plus faible atténuation de propagation (autrement dit le plus proche du point d'accès) ce qui conduirait à une allocation proche du MaxSNR. Lors de nos différentes simulations nous avons constaté que l'atténuation de propagation subie par un utilisateur en mouvement était quasi-constante sur un intervalle de l'ordre de la minute. En conséquence, les $M_{k,n}$ doivent impérativement être calculés sur un intervalle de temps inférieur à cette durée.

En considérant les deux contraintes ci-dessus, nous avons estimé qu'il était raisonnable de calculer la moyenne des valeurs $m_{k,n}$ sur un intervalle de temps compris entre 500 ms et 5 s. Dans les faits, nous avons fixé celui-ci à 1 seconde.

Avec une telle allocation, le flux sélectionné n'est plus celui qui permet d'obtenir à un instant donné le meilleur débit mais celui qui a le débit le plus intéressant par rapport à celui dont il dispose en moyenne. Sur le long terme, cette nouvelle façon de réaliser une allocation opportuniste peut s'avérer rentable car la diversité multi-utilisateurs est mieux préservée et l'équité du système légèrement améliorée. Cependant les mobiles éloignés restent fortement pénalisés ce qui provoque une variation non souhaitable de la QoS lors des déplacements des mobiles.

Le CPF résoud ce problème en introduisant le facteur de compensation CF_k dans l'allocation de ressources PF. Pour chaque intervalle de temps, la sous-porteuse n est alors allouée au flux k pour lequel le paramètre $F_{k,n}$ est le plus grand avec :

$$F_{k,n} = PF_{k,n} \times CF_k, \quad (4.11)$$

ou encore :

$$F_{k,n} = \left(\frac{m_{k,n}}{M_{k,n}} \right) \times \frac{b_{ref}}{b_k}. \quad (4.12)$$

Le paramètre CF_k permet de compenser les faibles débits obtenus en moyenne par les mobiles éloignés en leur attribuant proportionnellement plus de priorité. Ainsi, il est attribué aux utilisateurs la quantité exacte d'URs nécessaires à l'obtention d'un débit égal pour tous et ce quelle que soit la position respective de chacun. Cette amélioration du PF est donc plus efficace que celle du MaxSNR puisqu'elle permet de gérer correctement la mobilité intracellulaire des utilisateurs en garantissant un même débit à tous et donc une équité de niveau 2, quels que soient les déplacements des utilisateurs dans la cellule. Le paramètre $PF_{k,n}$ permet quant à lui d'allouer les URs aux flux des mobiles dont l'atténuation liée aux multi-trajets est la moins grande et donc de conserver un débit global élevé. Nous verrons par la suite que, sans nuire au bénéfice procuré par l'approche opportuniste en termes de maximisation du débit, le CPF permet ainsi d'accroître de manière significative l'équité et la QoS du système comparé au PF.

4.4 Diagramme d'états-transitions du FMaxSNR et du CPF

Les deux allocations, FMaxSNR et CPF, suivent le même diagramme d'états-transitions (figure 4.1). L'allocation est effectuée sous-porteuse par sous-porteuse pour chaque intervalle de temps et les priorités des flux sont déterminées selon les valeurs $F_{k,n}$. La description, étape par étape, des deux algorithmes est donnée ci-dessous :

- **Etape 0 :** L'ordonnanceur rafraîchit les valeurs de b_k , $m_{k,n}$ et BO_k (nombre de paquets dans la file d'attente du flux k appelé « *Buffer Occupancy* »), puis il calcule les paramètres CF_k et $F_{k,n}$ pour chaque flux et chaque sous-porteuse. Les entiers n et t (indexant respectivement la sous-porteuse et l'intervalle de temps considérés) sont ensuite initialisés à 1.
- **Etape 1 :** Pour chaque sous-porteuse n , l'ordonnanceur sélectionne le flux k pour lequel le paramètre $F_{k,n}$ est le plus grand. Si plusieurs flux ont la même valeur $F_{k,n}$, l'ordonnanceur choisit celui pour lequel l'occupation de file d'attente BO_k est la plus élevée.
 - **Sous-étape 1-1 :** Si il reste des paquets du flux k à transmettre ($BO_k > 0$), l'ordonnanceur passe à la sous-étape 1-2. Sinon, si il reste des flux avec des files d'attente non vides, l'ordonnanceur sélectionne parmi les flux non encore traités celui qui a le plus grand $F_{k,n}$ et recommence la sous-étape 1-1 (si plusieurs flux ont le même $F_{k,n}$, l'ordonnanceur choisit également celui qui a l'occupation de file d'attente BO_k la plus élevée). Dans le cas où toutes les files d'attente de tous les flux ont été vidées, l'ordonnanceur passe à l'étape 2.
 - **Sous-étape 1-2 :** L'ordonnanceur alloue l'intervalle de temps t de la sous-porteuse n au flux k avec une autorisation de transmission de $m_{k,n}$ bits. Ensuite, il soustrait $m_{k,n}$ bits de la valeur de BO_k et incrémente la valeur t d'une unité. Si t est plus petit que le nombre maximum d'intervalles de temps disponibles t_{max} , on revient à la sous-étape 1-1 pour allouer le prochain intervalle de temps de la sous-porteuse considérée. Dans le cas contraire, on passe à la sous-étape suivante.
 - **Sous-étape 1-3 :** On ré-initialise la valeur de t à 1 et on incrémente la valeur de n d'une unité. Si n est plus petit que le nombre maximum n_{max} de sous-porteuses, on revient à l'étape 1 afin d'allouer les intervalles de temps d'une autre sous-porteuse. Dans le cas contraire, on passe à l'étape 2.
- **Etape 2 :** Toutes les files d'attente sont vides ou tous les intervalles de temps de toutes les sous-porteuses sont alloués. Le processus d'allocation est terminé.

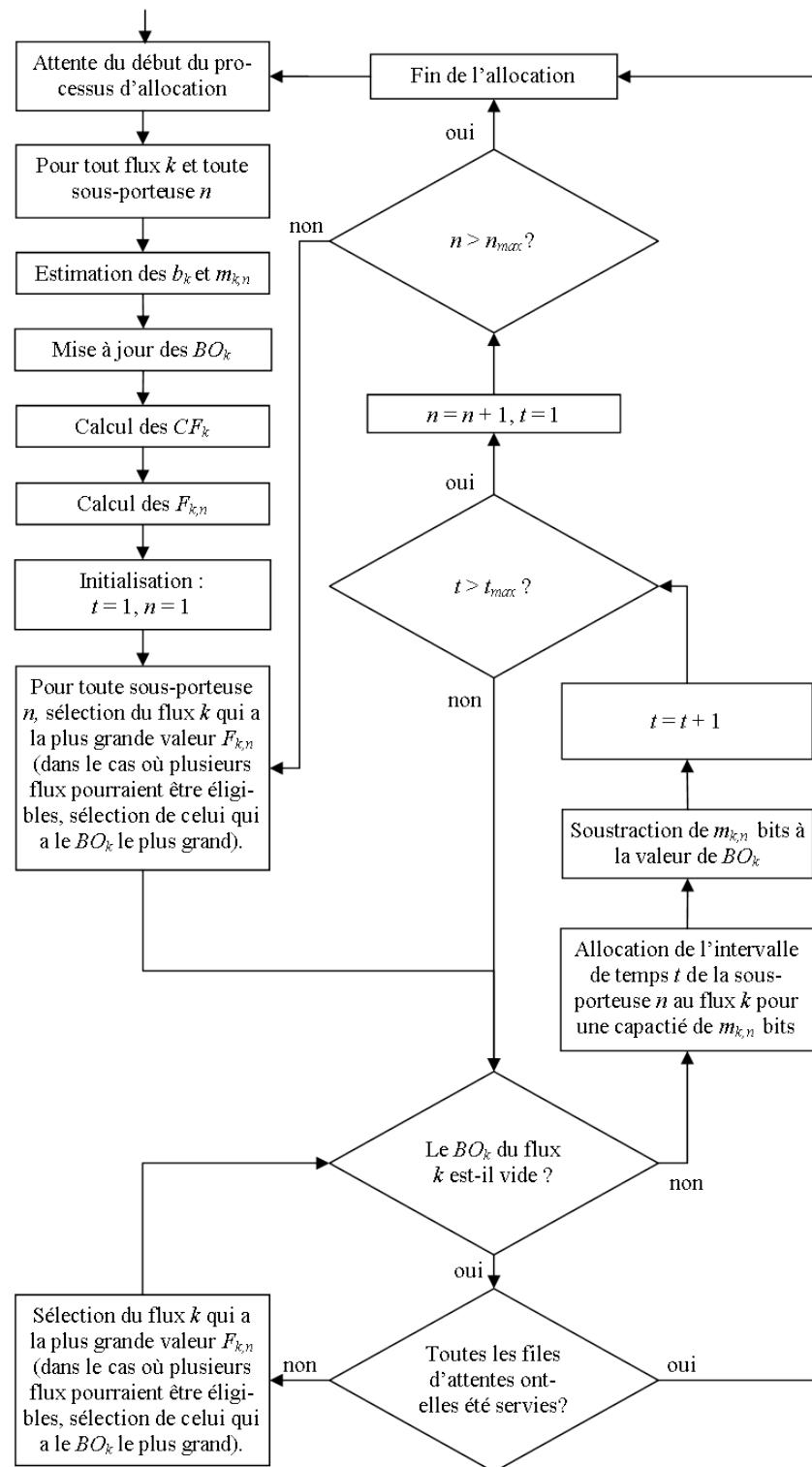


FIG. 4.1 – Diagramme d'états-transitions du FMaxSNR et du CPF.

4.5 Avantages

Dans les réseaux sans fil, les mobiles éloignés du point d'accès ont des transmissions à faible efficacité spectrale. Pour obtenir un même débit global que les mobiles proches du point d'accès, leurs flux nécessitent donc plus d'URs.

Grâce au facteur de correction de l'influence de la distance CF_k qui corrige l'effet néfaste de l'affaiblissement de propagation sur l'équité, les faibles débits par UR des mobiles éloignés sont compensés en augmentant la priorité de leurs flux de manière proportionnelle. L'attrait principal de nos deux propositions est donc qu'elles garantissent aux utilisateurs une meilleure gestion de leur mobilité dans la cellule avec une équité de niveau 1 pour le FMaxSNR et une équité de niveau 2 pour le CPF.

Au premier abord, on pourrait penser qu'une telle prioritisation des flux des mobiles éloignés peut nuire à la capacité globale de transmission du système mais il n'en est rien. Tout d'abord, avec l'utilisation des $F_{k,n}$ et donc des $m_{k,n}$, les CSIs sont pris en compte et une allocation opportuniste est conservée. Cela permet d'allouer à chaque flux les meilleures sous-porteuses et de profiter d'un débit global élevé. Ensuite, contrairement aux allocations MaxSNR et PF qui écoulent très rapidement le trafic des mobiles proches du point d'accès puis traitent dans un second temps le trafic des mobiles plus éloignés, les deux améliorations proposées gèrent simultanément tous les mobiles et gardent ainsi plus de flux actifs au cours du temps. Pour rappel, la diversité multi-utilisateurs est la condition *sine qua non* de l'efficacité d'un ordonnanceur opportuniste. Plus elle est grande, plus les algorithmes disposent d'un grand nombre de combinaisons « UR, flux » dans leur processus de sélection. Les cas où aucun mobile actif n'a de bon canal sont plus rares ce qui laisse davantage d'opportunités de réaliser des allocations performantes. Préservant au maximum la diversité multi-utilisateurs, nos propositions permettent de transmettre plus de données et d'obtenir un meilleur usage de la bande passante. Il est donc possible de fournir plus d'URs aux flux des mobiles éloignés sans pour autant nuire au débit global du système puisque celles-ci, allouées en supplément, sont « récupérées » par une préservation de la diversité multi-utilisateurs et donc « rentabilisées » par une allocation plus efficace à moyen terme. Nous verrons lors de l'évaluation de performances, chapitre 6, que la maximisation du débit est ainsi conservée voir accrue³.

³Notons que si deux flux ont un même $F_{k,n}$, la priorité est donnée au flux qui a le plus grand nombre de paquets dans sa file d'attente ce qui renforce encore l'équité et permet de mieux conserver la diversité multi-utilisateurs.

4.6 Conclusion et limites

De nombreux ordonneurs ont déjà été proposés afin de maximiser le débit global des systèmes OFDM. Cependant, jusqu'ici, garantir un haut niveau d'équité ne semblait pas envisageable sans nuire à la capacité du système. Les améliorations proposées dans ce chapitre, FMaxSNR et CPF, offrent une alternative à ce problème et présentent plusieurs avantages comparées à leurs versions d'origine :

- **Une meilleure équité** dans le processus d'allocation de ressources. En effet, avec le FMaxSNR, un même nombre d'URs est alloué à chaque mobile (équité de niveau 1) et, avec le CPF, un même débit leur est garanti (équité de niveau 2).
- **Un usage optimisé de la bande passante.** La diversité multi-utilisateurs est mieux conservée et donc un ordonnancement opportuniste efficace est plus longtemps réalisable.
- **Une gestion plus efficace des files d'attente.** Celle-ci sont vidées de manière plus régulière et les mobiles proches du point d'accès ne sont plus systématiquement traités avant les mobiles plus éloignés. La satisfaction des contraintes de temps est donc plus uniforme.

Au final, il en résulte deux ordonneurs performants qui procurent équité et maximisation du débit global du système sans aucun compromis. La qualité de service qui en résulte est donc largement réhaussée comme nous le verrons de manière détaillée au chapitre 6.

Cependant, en dépit de tous les avantages procurés par le FMaxSNR et le CPF, l'équité, bien que fortement améliorée, n'est toujours pas au niveau requis par certains réseaux et en particulier ceux acceptant les flux multimédia. En effet, allouer un même nombre d'URs ou assurer un même débit à tous n'est pas toujours suffisant pour assurer une QoS correcte dans le système ce qui n'est pas tolérable dans les réseaux actuels et futurs. L'équité visée doit donc être de niveau 3 afin de permettre à tous les utilisateurs d'être satisfaits à un même degré et ce quels que soient leurs besoins et le contexte. Pour ce faire, il est indispensable d'assurer une différenciation de service ce dont le FMaxSNR et le CPF, comme la plupart des ordonneurs actuels, sont incapables.

Dans le prochain chapitre, nous allons présenter la contribution majeure de cette thèse dont l'objectif est de résoudre ce problème crucial : offrir une différenciation de services et une équité de niveau 3 tout en continuant à maximiser les débits de façon opportuniste et sans pour autant augmenter de manière significative la complexité des algorithmes.

Chapitre **5**

Le Weighted Fair Opportunistic Scheduler (WFO)

5.1	Approche inter-couches	64
5.2	Algorithme	65
5.2.1	Maximisation du débit et intégrité des données	65
5.2.2	Différenciation de service, garantie d'équité et respect des contraintes temporelles	66
5.2.3	Cœur de l'algorithme	68
5.2.4	Calibration de l'algorithme et première évaluation de performances	69
5.2.5	Diagramme d'états-transitions de l'algorithme WFO	72
5.3	Conclusion	74

5.1 Approche inter-couches

L'essor actuel des réseaux sans fil impose aux ordonnanceurs nouvelle génération des objectifs de plus en plus ambitieux :

- **Augmenter la capacité globale des réseaux sans fil** pour faire face au nombre croissant d'utilisateurs et à des applications de plus en plus gourmandes en ressource radio ;
- **Gérer la mobilité intracellulaire** afin de garantir une qualité de service constante en tout point de la cellule ;
- **Différencier les services** afin de satisfaire correctement les besoins des nouvelles applications multimédia apparues cette dernière décennie (transfert de fichiers, web, mail, streaming, voix sur IP, etc.), que ce soit en termes de retard, gigue, BER ou débit...

Le premier objectif a été atteint grâce au MaxSNR et au PF et le deuxième via le FMaxSNR et le CPF. Dans ce chapitre, nous présentons la contribution majeure de cette thèse : le *Weighted Fair Opportunistic (WFO) scheduling*¹ [31–35], ordonnanceur capable d'atteindre conjointement ces trois objectifs. Notre réflexion est partie d'un constat : pour être efficace une allocation de ressources ne doit pas uniquement se baser sur les états des liens en occultant les aspects applicatifs [102, 103]. En effet, avec les algorithmes opportunistes classiques, les flux sélectionnés uniquement pour leurs $m_{k,n}$ élevés ne sont souvent pas ceux qui nécessitent une transmission immédiate. Cela se traduit par une dégradation inutile de la qualité de service qui pourrait être évitée par une attribution des ressources plus aboutie prenant en compte les contraintes applicatives des différents flux. En outre, à l'échelle de fonctionnement des ordonnanceurs et à un instant donné, certains flux peuvent être retardés sans dommage pour leur qualité de service au bénéfice d'autres qui traversent une période critique ; il faut donc en tirer profit.

À partir de cette analyse, l'algorithme WFO a été conçu avec le double objectif de trouver à la fois le meilleur moment « physique » pour envoyer des données avec la meilleure efficacité spectrale possible (comme tous les algorithmes opportunistes actuels) mais aussi de trouver le meilleur instant « applicatif » pour allouer les URs aux flux qui en ont la meilleure utilité et ainsi attribuer plus efficacement les priorités en fonction des besoins de chacun. Il s'agit de tenir compte des $m_{k,n}$ mais aussi du niveau d'urgence pour chaque flux à être traité. Conçu à partir d'une approche inter-couches, le WFO tient donc compte non seulement des spécificités physiques de la couche OFDM telles que les conditions radio (via les CSIs et les $m_{k,n}$) mais aussi des contraintes des couches hautes et en particulier

¹Travail partiellement subventionné par un financement européen (*Wireless Internet Project (WIP)*, contrat 27402).

applicatives, telles que les contraintes de qualité de service à respecter. Les informations de la couche physique sont exploitées dans le but de tirer profit de la diversité temporelle, fréquentielle et multi-utilisateurs pour maximiser le débit du système. Dans un même temps, les informations des couches applicatives sont utilisées grâce à un système de poids astucieux qui introduit des priorités dynamiques entre les flux. Ce système permet de réaliser une allocation opportuniste au niveau applicatif, de différencier les services et de fournir une équité de niveau 3, cela quelles que soient les applications utilisées, les positions et les déplacements des mobiles dans le système.

5.2 Algorithme

Le WFO permet de supporter efficacement les services multimédia dans les réseaux sans fil OFDM, à la fois dans le sens montant et descendant. Dans les deux cas, l'allocation est réalisée durant la phase de transmission des données, sens montant, et le résultat diffusé dans la sous-trame de signalisation, sens descendant (cf. figure 1.5). Elle prend en compte :

- les conditions de propagation spécifiques dont bénéficient les mobiles (CSIs),
- les volumes de données qu'ils ont à transférer (BO_k),
- les contraintes de qualité de service de chaque flux (BER_{target} , $PDOR_{target}$, T_k),
- leur qualité de service mesurée en temps réel (BER_k , $PDOR_k$).

L'algorithme WFO utilise des poids calculés à partir de deux composantes, chacune en charge d'objectifs distincts : la maximisation du débit et la gestion de l'intégrité des données d'une part, la différenciation de service, la garantie d'équité et la gestion des contraintes temporelles d'autre part.

5.2.1 Maximisation du débit et intégrité des données

Maximiser le débit est devenu la priorité absolue des futurs algorithmes d'allocation de ressources. Comme le PF, le MaxSNR et la plupart des ordonneurs opportunistes, le WFO se base sur les $m_{k,n}$ afin d'atteindre cet objectif dans une approche inter-couches MAC/PHY et donner la priorité aux mobiles bénéficiant de bons états de liens (les équations 4.1 à 4.9 restent donc valides). Le paramètre $m_{k,n}$ est donc la première des deux composantes du poids utilisé dans l'algorithme WFO.

À chaque début de cycle d'allocation, l'ordonnanceur calcule le nombre maximal de bits $m_{k,n}$ qui peuvent être transmis durant un intervalle de temps sur la sous-porteuse n si elle est assignée au flux k en respectant sa cible de taux d'erreur par bit (BER_{target}), ce pour tout k et tout n . Comme avec les précédents algorithmes, l'intégrité des données est donc garantie au niveau de la couche physique en adaptant la modulation et donc les $m_{k,n}$ en fonction des états des liens.

5.2.2 Différenciation de service, garantie d'équité et respect des contraintes temporelles

Tenir compte uniquement du $m_{k,n}$ dans le processus d'allocation permet d'atteindre un débit global dans le système proche de l'optimal. Cependant, viser à accroître uniquement les débits est trop réducteur dans le contexte actuel car cela ne permet pas, seul, de remplir le cahier des charges des réseaux modernes sans fil. Désormais, il faut également garantir une qualité de service élevée pour permettre le développement des applications multimédia et le support efficace d'une mobilité croissante. Dans cette optique, il est donc nécessaire de fournir équité et différenciation de service [104], ce qui ne peut être réalisé sans l'ajout d'un autre critère de décision dans l'attribution des priorités. En plus du $m_{k,n}$ nous introduisons une deuxième composante appelée *Weighted Fair parameter* dans le poids utilisé par l'algorithme WFO. Le *Weighted Fair parameter* du flux k , noté WF_k , est une fonction positive strictement croissante du $PDOR_k$ subi par le flux k :

$$WF_k = f(PDOR_k), \quad (5.1)$$

Calculer les priorités en fonction des valeurs de $PDOR_k$ permet d'attribuer les unités de ressource aux flux qui en ont le plus grand besoin. En effet, les $PDOR_k$ indiquent de manière pertinente le niveau de qualité de service fourni au flux k et le degré de satisfaction de leurs utilisateurs et ce quelles que soient les applications utilisées (cf. chapitre 3). D'une manière générale, subir des valeurs élevées de PDOR est significatif d'une qualité de service amoindrie. Ces flux à PDOR élevé ont donc besoin d'obtenir une prioritisation accrue dans le processus d'allocation de ressources comparé aux flux à faible PDOR. En allouant les priorités en fonction des valeurs de PDOR, les flux en période critique ont donc plus de chance de voir leur qualité de service préservée et leur satisfaction maintenue à un haut niveau. De plus, le WFO tenant compte simultanément des PDORs et des $m_{k,n}$ dans le processus d'allocation, cette QoS est apportée sans nuire au débit global du système.

Le PDOR est donc apparu pour nous non seulement comme un paramètre à minimiser *in fine*, mais aussi comme le paramètre permettant de quantifier le besoin de priorité de chaque flux. Tenir compte des PDORs permet au WFO de résoudre dynamiquement de nombreux sous-problèmes inhérents aux algorithmes d'ordonnancement actuels :

- Tout d'abord, **la mobilité intracellulaire est gérée et l'équité est obtenue entre utilisateurs situés à des positions différentes**. Lorsqu'un utilisateur s'éloigne du point d'accès, son $m_{k,n}$ moyen chute en raison de l'augmentation de l'atténuation de propagation ce qui entraîne une diminution de son débit possible et donc de sa QoS. Son $PDOR_k$ augmente alors et, avec les algorithmes opportunistes classiques (MaxSNR et PF), rien n'est prévu pour préserver la QoS de l'utilisateur qui se retrouvera rapidement insatisfait. Le WFO, lui, tient compte du PDOR dans son pro-

cessus d'allocation. L'utilisateur va donc se voir attribuer, proportionnellement à l'augmentation de son PDOR, davantage d'unités de ressource compensant ainsi son éloignement². Quand le PDOR d'un flux augmente, une priorité plus importante lui est attribuée ce qui permet un retour à la normale. Schématiquement, le WFO lie les priorités de chaque flux à leur PDOR, ce qui tend à stabiliser ces valeurs au cours du temps, quels que soient les positions et déplacements des mobiles dans la cellule. Les flux conservant des valeurs de PDORs uniformes, les mobiles voient donc leur QoS sauvegardée lors d'éventuels éloignements du point d'accès (résultat comparable au FMaxSNR et au CPF).

- De plus, **le WFO est capable de gérer efficacement les pics de trafic multimédia.** Avec l'apparition d'applications génératrices de trafic fortement sporadique et variable, être capable de donner à un instant particulier davantage de priorité aux flux qui sont en période de pics d'activité est un des grands avantages du WFO. Alors que les meilleurs ordonnanceurs actuels garantissent un même débit en permanence à tous les flux, le WFO, grâce aux PDORs, permet de faire varier les débits alloués à chacun en fonction de leurs besoins. Ainsi les flux à faible PDOR (qui ont par définition une QoS largement satisfaite) sont retardés en abaissant leurs priorités afin d'aider les flux en période d'activité intense qui nécessitent une attention particulière (en augmentant proportionnellement leur priorité). Cela s'effectue de manière mécanique : lorsqu'un flux est en période de pic, l'ordonnanceur a inévitablement du mal à traiter la totalité du trafic généré et le PDOR du flux augmente progressivement. Or, contrairement aux autres algorithmes, le WFO ne laisse pas la situation s'aggraver car la priorité accordée au flux augmente au fur et à mesure que son PDOR croît ce qui arrête et résorbe la dégradation de la QoS. Le PDOR retrouve alors sa valeur d'origine. Ainsi, alors qu'avec les ordonnanceurs classiques les sommets des pics de trafic sont traités hors délai, avec le WFO, les chances de traiter les pics à temps sont élevées.

Outre ces deux avantages, utiliser les PDORs dans l'algorithme d'allocation de ressources permet aussi de faire une réelle différenciation de service et de garantir une équité optimale de niveau 3 quel que soit le contexte :

- **Utilisateurs ayant des applications à besoins différents en termes de débit :** Dans ce contexte, les utilisateurs nécessitant les plus gros débits vont naturellement obtenir des valeurs de PDOR plus élevées comparativement aux utilisateurs demandant des débits modérés. Dans une approche purement opportuniste au niveau physique, les premiers seront donc largement moins satisfaits que les seconds. Or, à partir de l'instant où les utilisateurs sont acceptés dans le réseau, l'objectif logique est selon

²qui est implicitement répercuté sur les valeurs de PDOR.

nous de les satisfaire tous et, si possible, à un même niveau. Se basant en partie sur les PDORs pour attribuer les ressources, le WFO donne à chaque flux une priorité proportionnelle à leur PDOR et donc à leur demande en débit (puisque les débits requis impactent les PDORs). Ainsi, l'algorithme WFO tend à attribuer les URs jusqu'à ce que les valeurs de PDORs de chacun atteignent finalement un niveau comparable. La différenciation de service est alors assurée puisque, contrairement aux autres algorithmes opportunistes MaxSNR, FMaxSNR, PF et CPF, le WFO tient compte des besoins des utilisateurs et attribue les ressources en fonction des demandes, assurant ainsi un même niveau de satisfaction à chacun.

- **Utilisateurs ayant des applications à contraintes temporelles différentes ou nécessitant des taux d'erreur différents :** Prenons l'exemple de deux utilisateurs localisés à une même distance du point d'accès, le premier utilisant une application temps réel ayant une limite de retard maximum (T_k) à ne pas dépasser très basse et l'autre au contraire utilisant une application ayant un T_k plus grand. Quel que soit l'ordonnanceur utilisé, il sera toujours plus difficile de satisfaire le premier utilisateur comparativement au second³. Si seuls les $m_{k,n}$ sont considérés, le premier aura donc un PDOR et une qualité de service bien plus dégradés que le second. Comme précédemment, le WFO va interagir avec les valeurs de PDOR afin d'accorder davantage de priorité aux flux ayant les contraintes les plus strictes à respecter. De ce fait, le WFO est capable de traiter de manière différente tous les types de flux en allouant plus ou moins d'unités de ressource en fonction des besoins. *In fine*, tous sont équitablement satisfaits, quelles que soient leurs applications ainsi que les contraintes temporelles et de taux d'erreur binaire associées.

5.2.3 Cœur de l'algorithme

Le principe du WFO est d'allouer, pour un intervalle de temps donné, la sous-porteuse n au flux k qui a la plus grande valeur $WFO_{k,n}$, produit des deux composantes de poids précédemment décrites :

$$WFO_{k,n} = WF_k \times m_{k,n}. \quad (5.2)$$

Etant fonction du PDOR, le *Weighted Fair parameter* prend directement en compte le niveau de satisfaction des contraintes de retard de chaque flux, ce qui confère au WFO une gestion efficace et réactive de leur qualité de service. De plus, le couplage au paramètre $m_{k,n}$ permet de ne pas affecter la maximisation du débit global. Avec l'algorithme WFO, les flux respectant facilement leurs contraintes temporelles sont retardés avec parcimonie sans toutefois leur nuire. Ceci est réalisé au bénéfice d'autres flux qui traversent une période

³La même conclusion peut être faite en considérant un premier utilisateur d'application nécessitant une contrainte de BER stricte et un second avec une contrainte plus large.

plus critique et ce qu'elle qu'en soit la cause (éloignement de l'utilisateur, pic de trafic, contraintes en termes de retard, débit ou BER difficiles à respecter...). Il existe ainsi une très forte interdépendance dans le processus d'allocation WFO entre la satisfaction des utilisateurs, le niveau de QoS des flux et leurs priorités associées. Grâce à son algorithme, le WFO régule ces derniers au cours du temps : moins un utilisateur est satisfait, plus la valeur de son PDOR croît. Son WF_k croît alors à son tour provoquant une augmentation mécanique de la priorité accordée au flux concerné. Un nombre plus important d'URs lui est alors accordé, ce qui permet au final d'enrayer puis de corriger la dégradation de la qualité de service de l'utilisateur. Lorsque l'ordonnanceur a résorbé le surplus de trafic qui mettait un flux en difficulté en lui accordant plus de priorité, le PDOR de ce dernier revient à la normale et donc son WF également puisqu'il sort d'une période critique et satisfait à nouveau ses exigences en termes de QoS. La priorité du flux momentanément accrue repasse alors à la normale.

Les priorités accordées par le WFO évoluent donc en fonction des conditions de transmission mais aussi en fonction des niveaux de QoS subis par chaque flux. D'une manière simplifiée, les URs sont attribués aux flux qui peuvent bénéficier d'un bon débit (bon $m_{k,n}$) et qui en ont une forte utilité (des WF_k importants correspondant aux flux des mobiles « pressés d'être servis »). Contrairement aux algorithmes opportunistes classiques, les flux qui nécessitent une attention particulière sont donc traités en priorité sur les sous-porteuses qui leurs sont les plus favorables. Cela aboutit à une allocation équilibrée qui permet à la fois de maximiser le débit en sélectionnant des couples UR/flux à bonne efficacité spectrale mais aussi de différencier les flux en les traitant dynamiquement en fonction de leurs besoins, évitant ainsi que certains ne subissent une QoS dégradée ou soient victimes d'inéquité.

5.2.4 Calibration de l'algorithme et première évaluation de performances

Dans cette sous-section, nous présentons la construction de la fonction f de l'équation 5.1. Cette fonction doit répondre à plusieurs exigences. Tout d'abord il faut qu'elle n'offre ni trop, ni trop peu de réactivité aux fluctuations de PDOR. En effet, dans le premier cas le WFO accorderait une priorité disproportionnée aux flux subissant une très faible dégradation de leur qualité de service, au détriment des autres mobiles et de la capacité globale du système. Dans le second cas, le WFO ne réagirait au contraire pas assez vite aux fluctuations de PDOR et n'apporterait qu'une faible amélioration en terme d'équité face au MaxSNR ou au PF. De plus, il est impératif que la valeur de cette fonction du PDOR soit toujours d'un ordre de grandeur comparable aux valeurs de $m_{k,n}$ faute de quoi le WFO tiendrait trop ou trop peu compte dans son allocation des états des liens. Ceci nuirait dans le premier cas à l'équité et dans le second au débit global du système.

Nous avons testé de nombreuses formes de fonction pour le WFO et dans de multiples

scénarii, certaines très simples (affines), d'autres beaucoup plus complexes (logarithmique ou exponentielle par exemple). Les nombreuses simulations que nous avons effectuées nous ont permis de conclure rapidement que les fonctions trop simples n'offrent pas de bons résultats car elles ne procurent pas au WFO la réactivité nécessaire pour gérer efficacement les fluctuations de PDOR et donc la QoS. Parmi les fonctions plus élaborées, certaines offrent en revanche de bons résultats une fois correctement calibrées. Cependant la plupart de ces dernières étaient difficilement implémentables dans un algorithme d'allocation de ressources rapide car trop complexes. Seule la fonction polynomiale f définie ci-dessous nous est apparue comme exploitable. Ni trop simple, ni trop élaborée, elle fût la seule à procurer les meilleurs résultats constatés dans tous les scénarii tout en conservant une complexité raisonnable :

$$f(x) = A + \beta x^\alpha. \quad (5.3)$$

L'exposant α permet à l'algorithme d'être sensible et réactif aux fluctuations de PDOR ce qui garantit une équité à courte échelle de temps. β est quant à lui un paramètre de normalisation qui assure que WF_k et $m_{k,n}$ restent dans un même ordre de grandeur et donc que le WFO soit autant opportuniste au niveau applicatif qu'au niveau physique. Sachant⁴ que le $PDOR_k$ est une grandeur proche de 10^{-2} , la valeur de β doit être de l'ordre de $10^{2\alpha}$. Avec ce choix, WF_k est toujours d'une valeur comparable au $m_{k,n}$ et permet de concilier à la fois équité et maximisation de la capacité du système (cf. équation 5.2). Le paramètre A est pour sa part une constante égale à 1. Il permet de gérer correctement les cas où le PDOR serait égal à 0. En effet, lorsqu'une source commence une transmission (ou est pleinement satisfaite), le PDOR du flux considéré est égal à 0 mais pour autant, il ne doit pas être ignoré dans le processus d'allocation en raison d'une priorité toujours nulle.

Nous avons tenté au cours de cette thèse de trouver analytiquement les valeurs optimales de α et β . Cependant cela nécessitait de réussir à modéliser analytiquement un système réaliste utilisant le WFO. Pour ce faire il nous a fallu impérativement prendre en compte les variations des états des liens, des modèles de trafic réalistes, de nombreux mobiles et sous-porteuses mais aussi et surtout les spécificités de l'allocation WFO. Les essais de modélisation analytique auxquels nous avons abouti comportaient alors malheureusement trop d'états-transitions pour être résolus même après simplification des hypothèses

⁴Contrairement au MaxSNR ou au PF qui sacrifient généralement une partie des flux aux bénéfices d'autres procurant ainsi des PDORs compris entre 0 et 1, le WFO harmonise le PDOR de chaque flux quel que soit le contexte de manière à ce que ces derniers soient égaux et de l'amplitude la plus faible possible (cela sera confirmé dans les évaluations de performance du chapitre 6). Dans un contexte réaliste où un contrôle d'accès est supposé opérer dans le but d'empêcher le système de sortir de sa plage de fonctionnement, les PDORs obtenus avec le WFO sont donc généralement compris entre 0 et 0,1 même dans le cas d'un réseau fortement chargé. Au delà de ce seuil, nous pouvons considérer que le système est placé dans un contexte non réaliste, hors de sa plage de fonctionnement, et qu'aucune QoS ne peut être garantie de manière satisfaisante.

de départ. Nous n'avons pas réussi en particulier à modéliser de manière satisfaisante l'interaction qu'il existe entre la prise de décision de l'ordonnanceur WFO et son impact sur les sources en terme de PDOR et donc implicitement l'impact d'une allocation sur les suivantes. En effet, le WFO à la particularité de réaliser son allocation « sous l'influence » de ces décisions antérieures (via les PDORs). Il s'agit donc de modéliser un processus élaboré, « avec mémoire » soulevant bien des difficultés. De ce fait, une recherche analytique des valeurs optimales de α et de β nous a semblé trop complexe par la suite par rapport à la simulation dont nous pouvions attendre des résultats rapides.

Par conséquent au travers de nombreuses simulations, nous avons analysé l'influence de multiples couples (α, β) sur les performances de l'ordonnancement WFO afin de calibrer de manière adéquate la fonction f . Les figures 5.1(a) et 5.1(b) illustrent une partie de cette étude de calibration. Dans l'hypothèse de simulation présentée ici, la moitié des mobiles sont proches du point d'accès et les autres se situent deux fois plus loin, tous les mobiles utilisent une même application et ont une même contrainte de BER à respecter. La figure 5.1(a) représente l'évolution de la qualité de service dans le réseau via les PDORs (calculés sur tous les paquets) obtenus pour différentes valeurs de α couplées avec une valeur de β de $10^{2\alpha}$ comme définie précédemment. Nous pouvons y voir qu'une trop faible valeur de α nuit à l'équité tandis qu'une valeur trop élevée nuit au niveau de QoS moyen assuré dans le réseau. Entre ces deux extrêmes, une valeur de 3 offre en revanche la réactivité adéquate sur les fluctuations de PDOR pour assurer à la fois équité et QoS moyenne élevée (représentée par un PDOR moyen minimisé). Nous avons donc fixé par la suite la valeur de α à 3. La figure 5.1(b) montre les performances du WFO obtenues pour chaque valeur de β et avec la valeur de α fixée à 3. Elle montre que lorsque β est trop petit, le poids WF n'a pas assez d'influence dans le processus d'allocation comparé au $m_{k,n}$ et l'équité est perdue. Au contraire, si β est trop grand, ce sont les $m_{k,n}$ qui perdent trop d'importance dans l'allocation, celle-ci est moins opportuniste au niveau physique et une perte de la maximisation du débit global du système survient. Par la suite, la meilleure valeur de β a été trouvée égale à 10^6 . La fonction polynomiale f la plus simple et offrant les meilleurs résultats est donc :

$$f(PDOR) = 1 + 10^6 \times PDOR^3. \quad (5.4)$$

Outre les informations apportées pour la calibration du WFO, les figures 5.1(a) et 5.1(b) montrent une partie du potentiel du WFO. Lorsque α ou β est égal à 0, la fonction f est constante et seuls les $m_{k,n}$ influent sur les résultats de l'allocation. Avec ce paramétrage, le WFO se comporte exactement comme le MaxSNR qui est extrêmement inéquitable. Au contraire, avec un paramétrage adéquat des valeurs α et β , on peut remarquer qu'une très forte équité est apportée (rapprochement des courbes rouge et verte) et un PDOR moyen plus bas est obtenu tous flux confondus, illustrant ainsi l'amélioration de la QoS moyenne

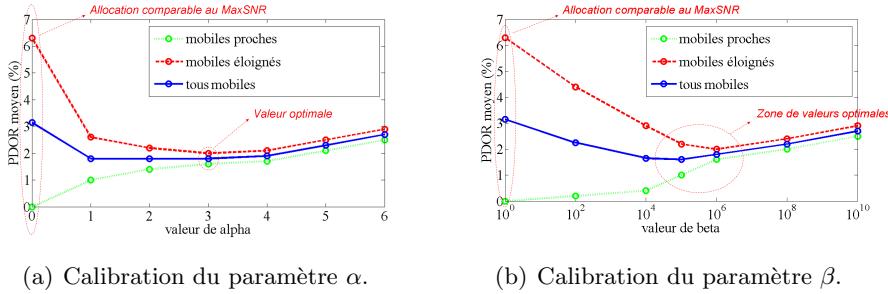


FIG. 5.1 – Calibration du paramètre de réactivité α et de normalisation β .

ressentie dans le réseau (courbe bleue). Les sources proches du point d'accès sont retardées afin de traiter prioritairement les paquets des mobiles éloignés sans pour autant dégrader leur QoS de façon significative. Les flux des mobiles éloignés, eux, ressentent en revanche une grande amélioration de leur QoS qui rejoint un niveau comparable à celui obtenu par les flux des mobiles proches. Cela montre bien qu'avec une allocation opportuniste sur plusieurs niveaux (physique et applicatif), il est possible de satisfaire davantage d'utilisateurs en leur garantissant une QoS moyenne plus élevée qu'avec une allocation opportuniste simple ne considérant que les aspects physiques des transmissions sans fil.

5.2.5 Diagramme d'états-transitions de l'algorithme WFO

Le diagramme d'états-transitions de l'algorithme d'allocation WFO (figure 5.2) suit sensiblement celui du FMaxSNR et du CPF. L'allocation est effectuée sous-porteuse par sous-porteuse, pour chaque intervalle de temps et les priorités des flux sont déterminées selon les valeurs du paramètre WFO . La description de l'algorithme est décrite ci-dessous étape par étape :

- **Etape 0 :** L'ordonnanceur rafraîchit les valeurs de $PDOR_k$, $m_{k,n}$ et BO_k , puis il calcule les paramètres WF_k et $WFO_{k,n}$ pour chaque flux et chaque sous-porteuse. Les entiers n et t sont ensuite initialisés à 1.
- **Etape 1 :** Pour chaque sous-porteuse n , l'ordonnanceur sélectionne le flux k pour lequel le paramètre $WFO_{k,n}$ est le plus grand. Si plusieurs flux ont la même valeur $WFO_{k,n}$, l'ordonnanceur choisit celui pour lequel l'occupation de file d'attente BO_k est la plus élevée afin de conserver au mieux la diversité multi-utilisateurs.
- **Sous-étape 1-1 :** Si il reste des paquets du flux k à transmettre ($BO_k > 0$), l'ordonnanceur passe à la sous étape 1-2. Sinon, si il reste des flux avec des files d'attente non vides, l'ordonnanceur sélectionne parmi les flux non encore traités celui qui a le plus grand $WFO_{k,n}$ et recommence la sous-étape 1-1 (si plusieurs flux ont le même $WFO_{k,n}$, l'ordonnanceur choisit également celui qui a l'occupation de

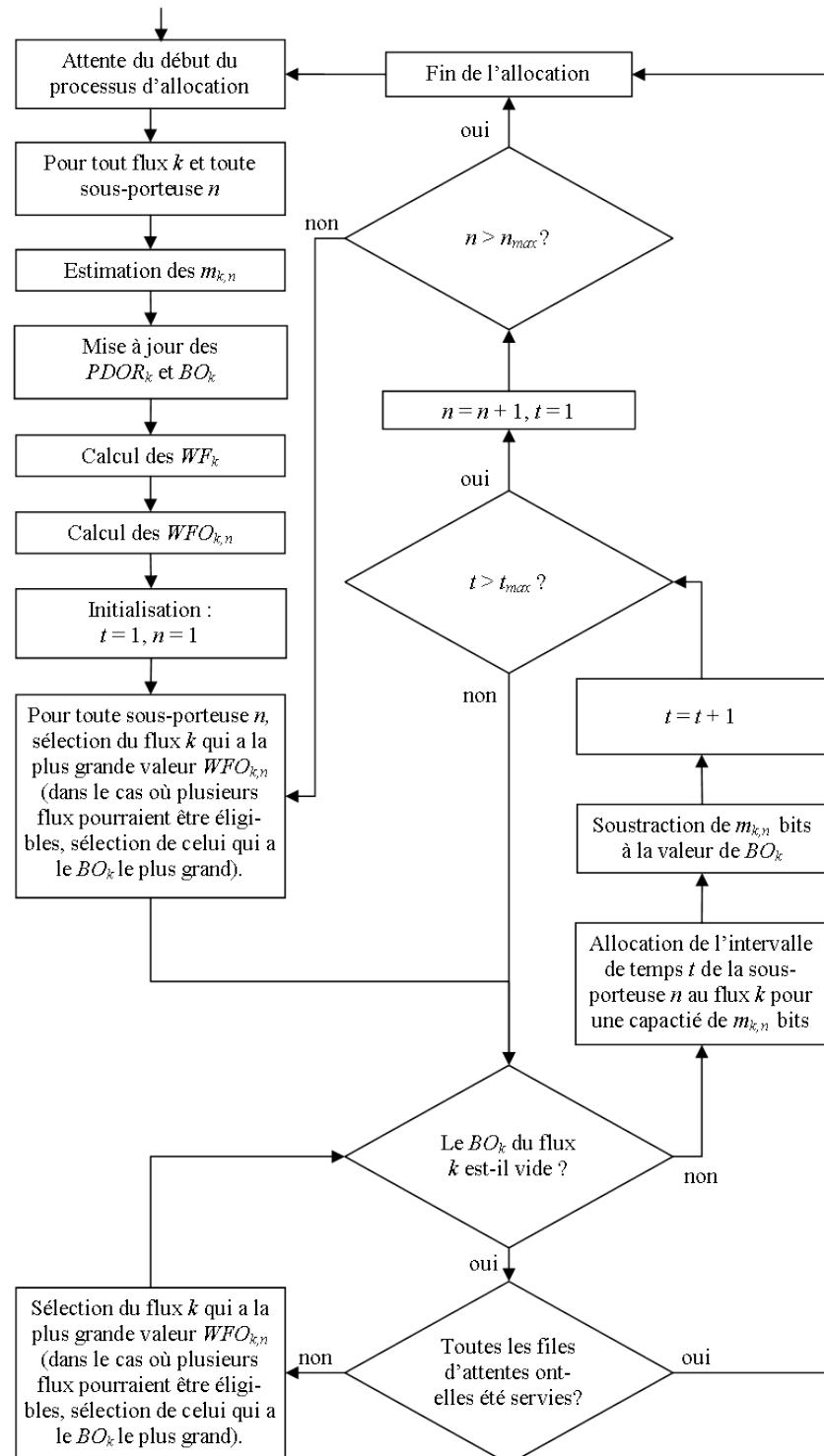


FIG. 5.2 – Diagramme d'états-transitions de l'algorithme WFO.

file d'attente BO_k la plus élevée). Dans le cas où toutes les files d'attentes de tous les flux ont été vidées, l'ordonnanceur passe à l'étape 2.

- **Sous-étape 1-2 :** L'ordonnanceur alloue l'intervalle de temps t de la sous-porteuse n au flux k avec une autorisation de transmission de $m_{k,n}$ bits. Ensuite, il soustrait $m_{k,n}$ bits de la valeur de BO_k et incrémenté la valeur t d'une unité. Si t est plus petit que le nombre maximum d'intervalles de temps disponibles t_{max} , on revient alors à la sous étape 1-1 pour allouer le prochain intervalle de temps de la sous-porteuse considérée. Dans le cas contraire, on passe à la sous-étape suivante.
- **Sous-étape 1-3 :** On ré-initialise la valeur de t à 1 et on incrémenté la valeur de n d'une unité. Si n est plus petit que le nombre maximum n_{max} de sous-porteuses, on revient à l'étape 1 afin d'allouer les intervalles de temps d'une autre sous-porteuse. Dans le cas contraire, on passe à l'étape 2.
- **Etape 2 :** Toutes les files d'attente sont vides ou tous les intervalles de temps de toutes les sous-porteuses sont alloués. Le processus d'allocation est terminé.

Dans la plupart des algorithmes existants, lorsqu'une différenciation de service est effectuée, les flux sont généralement traités groupe par groupe en fonction de leur classe, ce qui nuit grandement à l'efficacité d'un éventuel ordonnancement opportuniste car la diversité multi-utilisateurs est alors nettement plus réduite ([21] en est un exemple très représentatif). Un des avantages du WFO est de pouvoir gérer correctement tous les flux simultanément en différenciant les services dans une seule et même exécution de l'algorithme. Par cette approche originale et en s'appuyant sur le PDOR, le WFO peut en effet différencier les flux quels que soient les profils de QoS considérés tout en restant compatible avec l'approche opportuniste. Conservant un maximum de combinaisons possibles lors de l'attribution des unités de ressource, une allocation opportuniste efficace peut ainsi être obtenue. Cela conduit à des performances très intéressantes qui seront largement étudiées dans de nombreux contextes au chapitre 6.

5.3 Conclusion

L'allocation de ressources dans les réseaux sans fil est un problème très complexe. En plus des contraintes physiques inhérentes aux communications sans fil qui compliquent fortement les transmissions, il faut être capable d'assurer à la fois de hauts débits et de garantir un maximum d'équité et de QoS dans le réseau. Cela implique d'obtenir des transmissions plus efficaces mais aussi de satisfaire les besoins des utilisateurs quelles que soient leurs positions géographiques ou le type d'application qu'ils utilisent. Il est donc nécessaire que les ordonnanceurs gèrent efficacement, en plus de la mobilité intracellulaire, la coexistence de flux à différentes contraintes de taux d'erreur par bit, à différents besoins en termes

de débit mais également aussi bien les flux temps réels que les flux à faibles contraintes temporelles via une différenciation de service efficace.

Dans ce contexte, l'algorithme WFO permet une avancée importante puisqu'il accroît les bénéfices d'une approche opportuniste classique en l'étendant aux couches hautes via l'utilisation judicieuse du paramètre PDOR. L'allocation du médium prend en compte simultanément les conditions de transmission mais aussi le niveau de QoS de chaque flux. Cette double approche inter-couches opportuniste permet au WFO d'atteindre une équité de niveau 3 tout en optimisant le débit global du réseau, garantissant ainsi une QoS élevée et un même niveau de satisfaction des contraintes de retard pour tous les flux (i.e. garantissant un même PDOR à tous). Enfin, le WFO assure une différenciation de service entre les flux, permettant la gestion efficace aussi bien des flux à différentes contraintes d'intégrité (BER_{target}) que des flux à contraintes de délai différentes (T_k) ou à débits différents...

Evaluation de performances

6.1	Introduction	78
6.2	Hypothèses et paramétrage général des simulations	78
6.3	Premier scénario : influence du facteur distance	80
6.3.1	Contexte statique	80
6.3.2	Contexte mobile	89
6.3.3	Bilan	93
6.4	Second scénario : trafics hétérogènes	93
6.4.1	Sources à besoins différents en termes de débit	93
6.4.2	Sources à contraintes de retard différentes	95
6.5	Troisième scénario : analyse globale des performances des ordonneurs	96
6.6	Conclusion	98

6.1 Introduction

Ce chapitre présente une synthèse de l'ensemble des travaux d'évaluation de performances réalisés au cours de cette thèse. Les ordonnanceurs étudiés sont les ordonnanceurs opportunistes les plus connus (MaxSNR et PF), nos propositions (FMaxSNR, CPF et WFO) ainsi que le Round Robin (RR) qui sert de référence en tant que représentant des ordonnanceurs classiques non-opportunistes. Nous nous sommes concentrés principalement sur trois critères de performance majeurs : l'équité, la maximisation du débit global et le niveau moyen de qualité de service fournie aux utilisateurs.

Notre étude a été réalisée essentiellement via le simulateur à événements discrets *OP-NET*¹ et représente plusieurs milliers d'heures de simulation. Parmi les nombreux scénarios étudiés, trois sont présentés ici :

- **Scénario 1** : nous analysons les comportements des ordonnanceurs lorsque les mobiles occupent des positions géographiques différentes dans la cellule afin d'observer l'influence du facteur distance sur les performances. L'étude est réalisée tout d'abord dans un contexte statique puis à forte mobilité intracellulaire.
- **Scénario 2** : nous examinons les performances des ordonnanceurs lorsque les mobiles ont des exigences différentes à satisfaire en termes de débit puis, lorsque les mobiles ont des contraintes temporelles différentes à respecter. Cette étude permet d'apprécier les capacités respectives des ordonnanceurs à différencier les services.
- **Scénario 3** : nous considérons, pour conclure, un cas général où les mobiles ont à la fois des positions différentes, des besoins différents en termes de débit et des contraintes temporelles variées à respecter.

6.2 Hypothèses et paramétrage général des simulations

Dans nos simulations, nous considérons un réseau de type WiMAX avec une modulation MAQ dont on peut adapter l'ordre en fonction de l'état du lien, sous-porteuse par sous-porteuse. Nous considérons dans ce cadre 128 sous-porteuses par trame et 5 intervalles de temps par sous-trame de données, ce qui offre un total de 640 URs par trame pour chaque sens de transmission, soit une quantité suffisante pour permettre une allocation opportuniste. De plus, le modèle de canal pour chaque sous-porteuse suppose une atténuation en espace libre et un affaiblissement lié aux multi-trajets [9]. À une distance de référence d_{ref} , l'atténuation de propagation est notée a_{ref} . Considérant la sous-porteuse n , le gain $a_{k,n}$ du

¹Les modèles prédéfinis dans *OPNET*, comme dans la plupart des simulateurs, sont souvent jugés peu réalistes [105]. Nous avons donc utilisé *OPNET* comme plateforme de simulation dans laquelle tout a été reprogrammé. À titre d'exemple, le modèle de canal utilisé a ainsi été implémenté de manière à être conforme au standard [7, 20].

canal pour le mobile k situé à une distance d_k du point d'accès s'écrit :

$$a_{k,n} = a_{ref} \times \left(\frac{d_{ref}}{d_k} \right)^{3.5} \times \alpha_{k,n}^2, \quad (6.1)$$

où $\alpha_{k,n}^2$ représente l'affaiblissement plat (lié aux multi-trajets) subi par le flux du mobile k si il est transmis sur la sous-porteuse n .

Il est également considéré que chaque mobile a une même puissance maximale de transmission qui satisfait :

$$10 \log_{10} \left(\frac{P_{max} T_s}{N_0} \times a_{ref} \right) = 31 \text{ dB.} \quad (6.2)$$

De plus, la cible de taux d'erreur binaire (BER_{target}) est fixée à 10^{-3} . Avec ce paramétrage, pour les mobiles situés à la distance de référence d_{ref} et avec une valeur moyenne de $\alpha_{k,n}^2$ égale à l'unité, la valeur de $m_{k,n}$ est de 6 bits.

Dans les simulations présentées dans ce chapitre, nous nous focalisons sur le sens descendant (à cet égard, il est précisé que d'autres simulations focalisées sur le sens montant ont été réalisées avec des résultats similaires). En outre, un contrôle d'accès est supposé avoir lieu en permanence afin d'éviter la saturation du réseau à long terme, ce qui conduirait à des valeurs de retard non bornées et une situation d'instabilité. Dans un tel contexte, il serait en effet difficile de comparer les performances des différents ordonnanceurs testés puisqu'aucun de leurs objectifs ne seraient atteignables. En conséquence, dans nos simulations, la charge de trafic qui entre dans le système n'excède pas la capacité totale du système sur le long terme et les mobiles ne sont pas supposés toujours avoir des données à transmettre (les pics de surcharge sont en revanche tolérés)².

Nous considérerons également que les mobiles génèrent un trafic de type vidéoconférence. Ce type d'application réaliste engendre des volumes importants de données de façon très sporadique et impose des contraintes temporelles strictes. Ce profil de trafic complique singulièrement la tâche des ordonnanceurs et permet ainsi une bonne évaluation des performances de ces derniers. Afin de simplifier quelque peu l'interprétation des résultats, il sera cependant supposé que chaque mobile n'a qu'un seul flux actif au cours du temps, un flux étant composé de trafic MPEG-4 pour la vidéo [106] et AMR pour la voix [107]. Par ailleurs, pour évaluer la capacité de chaque ordonnanceur à tirer profit de la diversité multi-utilisateurs, la charge de trafic dans nos différentes simulations sera augmentée en faisant croître le nombre de mobiles, ce qui offre en outre l'avantage d'être réaliste.

²Dans le cas extrême d'un réseau complètement saturé et n'effectuant pas de contrôle d'accès, la meilleure solution serait une attribution de ressources de type MaxSNR qui permettrait alors de transmettre un maximum de paquets. Notons que dans ce contexte, les délais tendent vers l'infini et les PDORs vers 100 %. Le WFO ne tenant alors plus compte que des $m_{k,n}$ assurerait, dans ce pire cas, la même allocation que le MaxSNR.

6.3 Premier scénario : influence du facteur distance

6.3.1 Contexte statique

Dans les réseaux sans fil, un des problèmes récurrents rencontrés est que les mobiles les plus éloignés du point d'accès obtiennent généralement une bien moindre QoS que les mobiles plus proches car l'efficacité spectrale de leur transmission est largement inférieure. Pour étudier la capacité des ordonnanceurs à gérer correctement des flux provenant de mobiles localisés à des positions différentes dans le réseau, les mobiles sont rassemblés ici en deux groupes : le premier est placé proche du point d'accès, à une distance de $1.5 d_{ref}$; le second est placé deux fois plus loin. Avec ces hypothèses, les valeurs de $m_{k,n}$ pour les deux groupes de mobiles sont respectivement de 4 et 2 bits lorsque $\alpha_{k,n}^2$ est égal à 1, ce qui privilégie nettement les mobiles du premier groupe face au second. Les autres paramètres (débit souhaité et contrainte temporelle) sont identiques pour tous les mobiles comme décrit dans la table 6.1 :

TAB. 6.1 – Scénario 1 : paramétrage des flux dans le modèle statique.

Groupes	Distance d_k	Seuil de retard maximum toléré T_k	Débit souhaité
1	$2 d_{ref}$	80 ms	80 kbit/s
2	$3 d_{ref}$	80 ms	80 kbit/s

Equité et QoS :

Notre étude s'est tout d'abord focalisée sur l'aptitude des ordonnanceurs à garantir l'équité. Être équitable consiste à assurer à tous les flux un même degré de qualité de service et en particulier un même pourcentage de paquets en « *delay outage* » (i.e. un même PDOR)³. La figure 6.1 montre les PDORs moyens obtenus pour différentes charges de trafic en portant une attention particulière sur la différence de traitement entre les deux groupes de mobiles localisés à une distance différente du point d'accès.

Nous pouvons tirer de ces premiers résultats que l'ordonnanceur classique Round Robin procure de très mauvaises performances et est incapable d'assurer le même PDOR aux différents groupes de mobiles. En effet, le RR alloue équitablement les RUs aux mobiles mais sans jamais prendre en considération le fait que les mobiles les plus éloignés du point d'accès ont une efficacité spectrale bien plus faible que les mobiles plus proches. Il en découle une inégalité dans les débits instantanés fournis et donc une inéquité en terme de QoS. De plus, le RR ne tire pas profit de la diversité multi-utilisateurs ce qui entraîne une sous-utilisation de la bande passante et, à terme, un très faible débit global du système. En

³Tous les mobiles étant servis « tôt ou tard », l'équité en termes de débit finit quant à elle toujours par être obtenue à plus ou moins long terme.

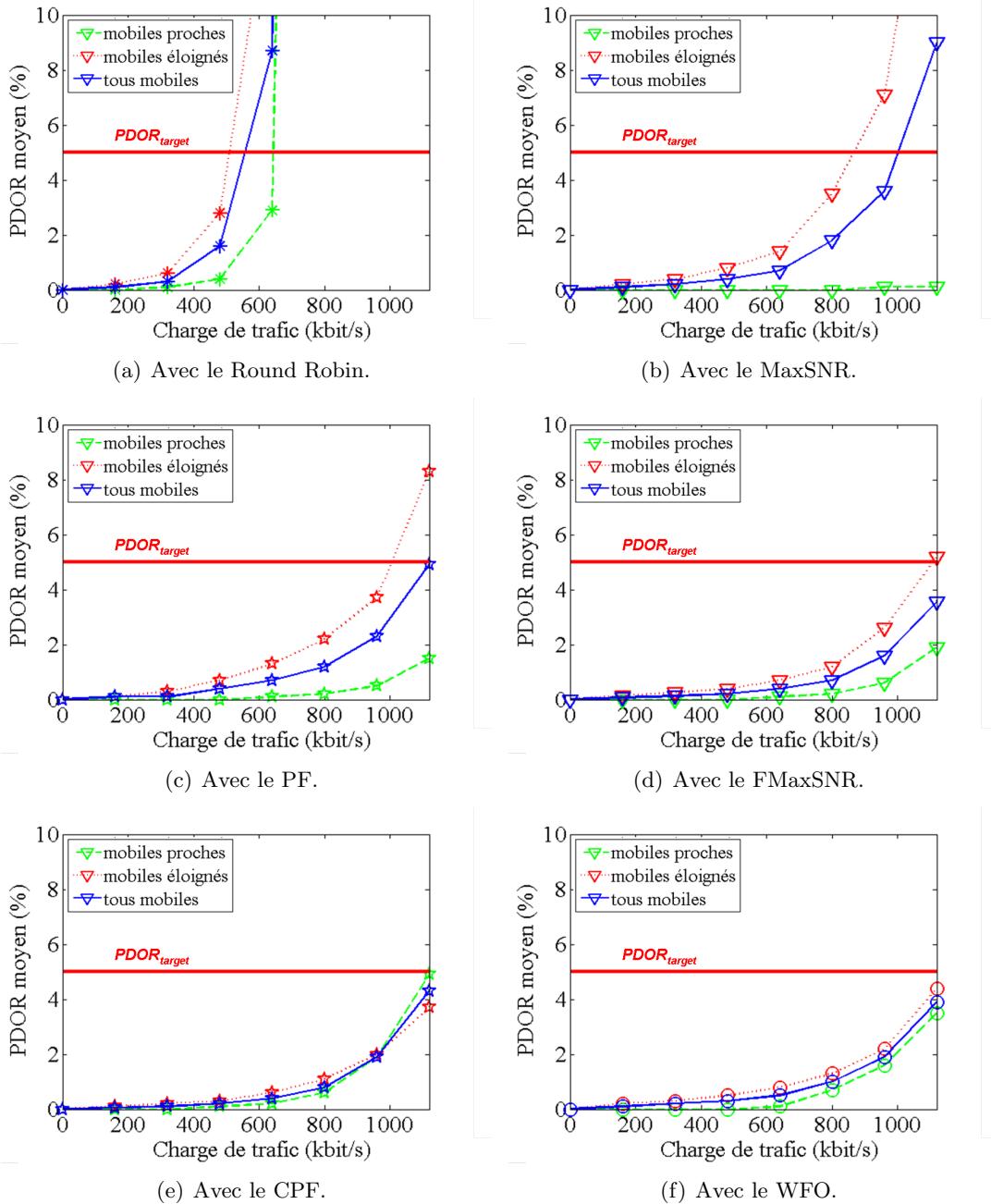


FIG. 6.1 – QoS mesurée avec les différents ordonneurs.

conséquence, un PDOR acceptable de 5 % est largement dépassé même avec des charges de trafic relativement faibles⁴.

S'appuyant sur une approche opportuniste, les cinq autres ordonnanceurs montrent en revanche de bien meilleures performances en supportant des charges de trafic bien plus élevées. Dans ce cadre, le MaxSNR et le PF montrent cependant toujours de grandes disparités dans le traitement des deux groupes de mobiles (comme le RR) : les mobiles proches voient leur flux respecter très facilement les contraintes de retard tandis que les plus éloignés voient une grande part de leurs paquets arriver « hors délai ». Plus la charge augmente, plus cette différence de traitement est marquée, ce qui aboutit au final à une dégradation précoce de la QoS des mobiles éloignés. Au contraire, les trois ordonnanceurs proposés dans cette thèse, le FMaxSNR, le CPF et le WFO procurent un degré de QoS proche voir égal (pour les deux derniers cités) pour tous les mobiles, quelles que soient les positions respectives de chacun, ce qui garantit une allocation parfaitement équitable (en particulier pour le CPF et le WFO). Cela permet d'atteindre les plus grandes charges de trafic avec un PDOR et un niveau de QoS acceptable pour tous. En outre, au regard des valeurs de PDOR moyen pour les différentes charges de trafic, on peut remarquer qu'en plus d'assurer l'équité, le FMaxSNR, le CPF et le WFO garantissent un degré de qualité de service global meilleur que les ordonnanceurs opportunistes référents.

Nous nous focalisons à présent sur le niveau moyen de satisfaction que chaque mobile perçoit au cours du temps. Pour ce faire, nous divisons la connexion d'un mobile en cycles de 5 minutes et nous mesurons son PDOR à la fin de chaque cycle. La figure 6.2 montre les fonctions de répartition des valeurs de PDOR de fin de cycle pour une charge de trafic sur le réseau de 960 kbit/s en utilisant successivement un ordonnancement MaxSNR, PF, FMaxSNR, CPF et WFO⁵. De ces résultats, nous pouvons estimer par la suite le pourcentage d'insatisfaction des utilisateurs en calculant le nombre de cycles où les contraintes temporelles ne sont pas respectées ($PDOR_k > PDOR_{target}$ en fin de cycle), divisé par le nombre total de cycles (cf. figure 6.3).

Ces résultats nous confirment que le MaxSNR n'est pas équitable. Il garantit un haut niveau de QoS et de satisfaction aux mobiles proches du point d'accès mais aux dépens des mobiles éloignés dont seulement 54,5 % bénéficient d'un PDOR de fin de connexion inférieur à la valeur limite de 5 % (cf. figure 6.2(a)). Des priorités inutiles et superflues sont en effet données aux mobiles proches, qui satisfont aisément leurs contraintes de qualité de service (cf. courbe verte), alors que plus d'attention devrait être accordée aux mobiles éloignés en difficulté (cf. courbe rouge). Cette attribution inadéquate des priorités accroît

⁴Le seuil des 5 % peut être considéré comme proche d'un $PDOR_{target}$ réaliste.

⁵Les performances du RR ne sont pas représentées ici car cet ordonneur ne permet pas de supporter une telle charge de trafic.

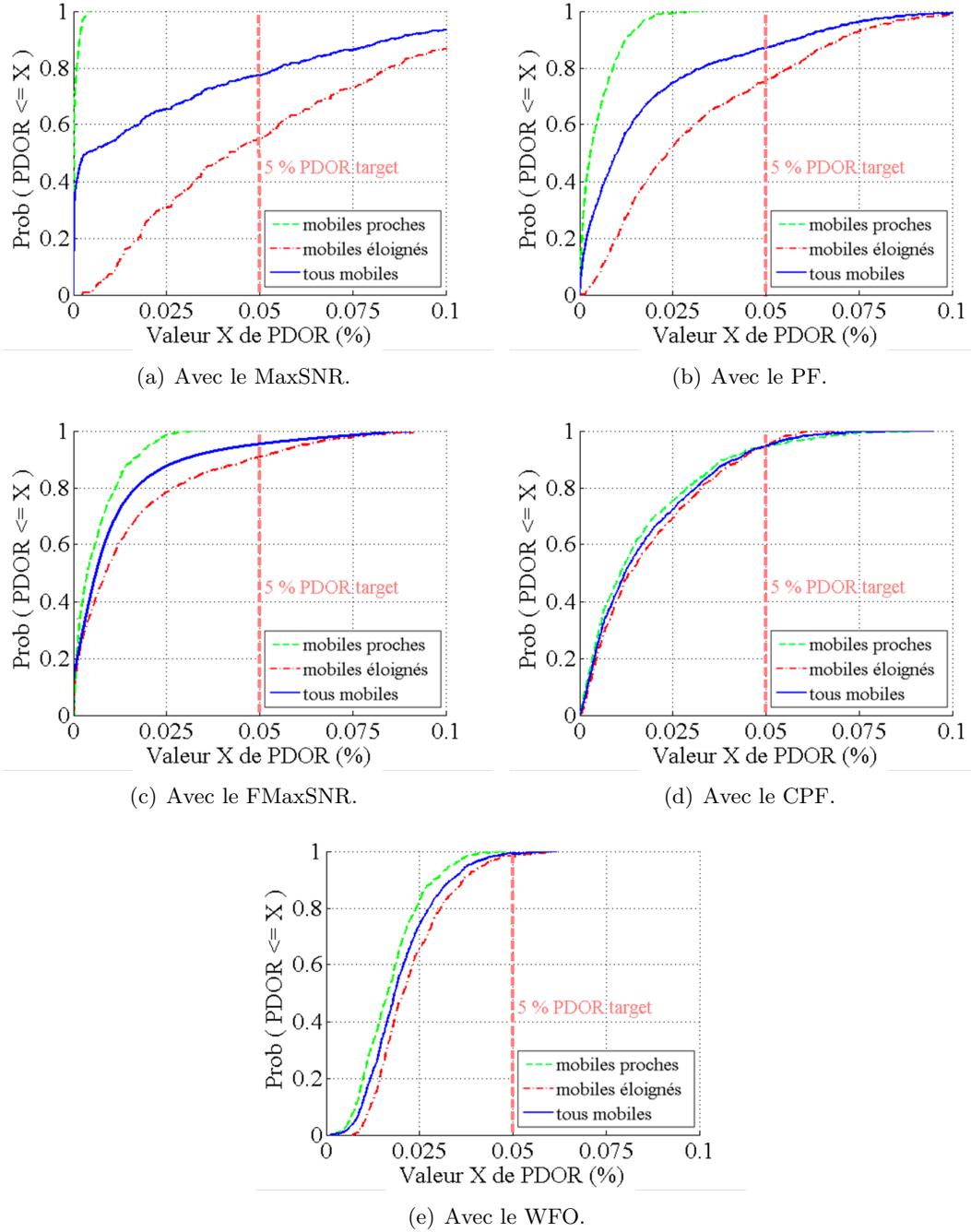


FIG. 6.2 – Fonctions de répartition des valeurs de PDOR obtenues avec les différents ordonnanceurs.

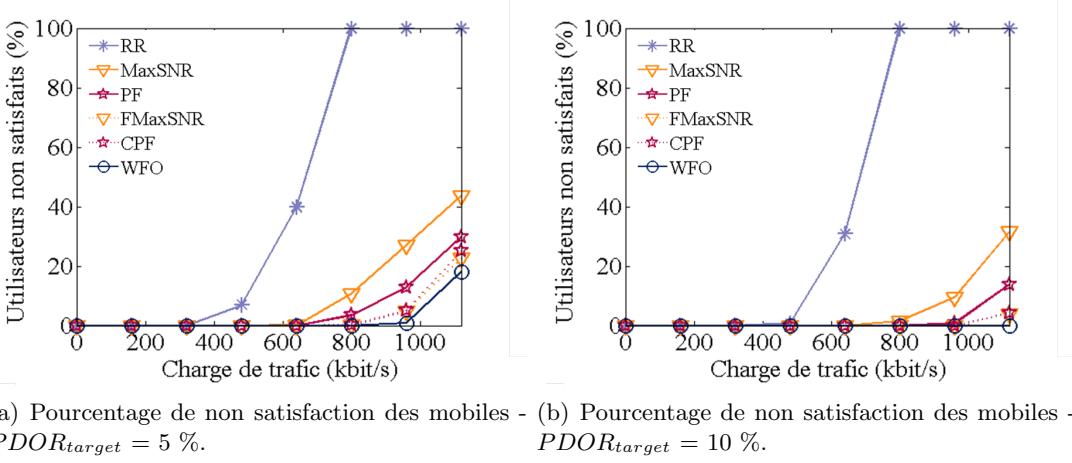
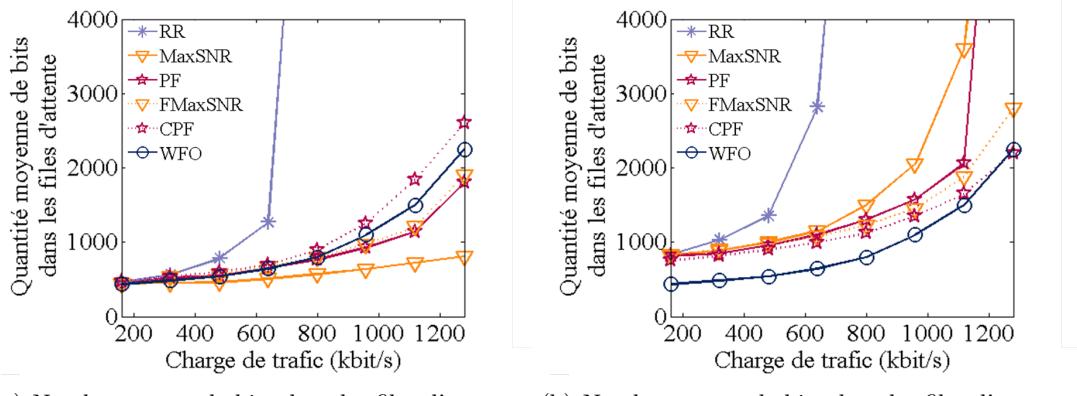


FIG. 6.3 – Analyse du respect des contraintes de QoS pour différents seuils d'exigence.

au final considérablement le taux global de mobiles insatisfaits qui atteint 23 % (cf. figures 6.2(a) et 6.3(a)).

Le PF est plus équitable et alloue davantage de priorités aux mobiles éloignés en fournissant à chacun sur le moyen/long terme le même nombre d'unités de ressource. Ce procédé reste cependant sous-optimal puisque les mobiles éloignés n'ont pas la même efficacité spectrale que les mobiles plus proches à cause du *path loss*. En dépit d'un partage égal de la bande passante entre les mobiles, différents débits sont donc obtenus induisant à terme des disparités dans les temps de transfert des paquets et dans les niveaux de QoS assurés aux flux. Comparé au MaxSNR, le PF offre tout de même une véritable amélioration de la QoS en divisant par 2 le ratio de mobiles insatisfaits alors égal à 12,8 % (cf. figures 6.2(b) et 6.3(a)). Ce résultat nous montre aussi que l'augmentation du niveau d'équité permet d'une manière générale d'augmenter le niveau de QoS global d'un système et que certains flux peuvent en effet être retardés au bénéfice d'autres sans préjudice sur leur qualité de service.

Le FMaxSNR, le CPF et le WFO sont construits sur cette idée. La satisfaction aisée des mobiles proches (dotés d'une meilleure efficacité spectrale) offre un degré de liberté qui peut être exploité pour aider les mobiles plus éloignés. Ces ordonnanceurs adaptent dynamiquement leurs priorités en fonction de la position des mobiles. Les flux qui ne posent pas problème se voient donc allouer moins de priorité (sans toutefois affecter significativement leur QoS) afin d'en accorder plus aux mobiles en difficulté. Il est ainsi alloué à chaque mobile, quelle que soit sa position, la part précise de bande passante requise pour la satisfaction de ses contraintes de qualité de service. De cette façon, ces nouveaux systèmes de priorisation permettent de réduire significativement le taux d'insatisfaction des mobiles éloignés sans causer un véritable « manque à gagner » aux mobiles proches. Avec le FMaxSNR et le



(a) Nombre moyen de bits dans les files d'attentes pour les mobiles proches du point d'accès.
(b) Nombre moyen de bits dans les files d'attentes pour les mobiles éloignés du point d'accès.

FIG. 6.4 – Etat d'occupation des files d'attente.

CPF, le pourcentage global d'insatisfaction est ainsi divisé par plus de 2 comparativement au PF en passant de 12,8 % à près de 5 % et il est divisé par 4 si on compare ces résultats au MaxSNR qui offre un taux de 23 % (cf. figures 6.2(a), 6.2(b), 6.2(c), 6.2(d) et 6.3(a)). De plus, notons qu'avec le WFO, l'amélioration est encore plus visible puisque ce pourcentage est de seulement 0,8 %, soit plus de 10 fois plus faible que celui offert par le PF (cf. figures 6.2(e) et 6.3(a)).

L'observation d'un autre paramètre, le taux moyen d'occupation des files d'attente, nous aide à mieux comprendre comment nos propositions peuvent offrir de tels résultats. On peut voir clairement dans la figure 6.4 que le FMaxSNR, le CPF et le WFO limitent l'accumulation excessive, en particulier pour les mobiles éloignés, des paquets dans les files d'attente ce qui permet d'augmenter la proportion de paquets pouvant être traités à temps et de rester en dessous des valeurs de $PDOR_{target}$ pour toute charge de trafic. Avec leur système de poids, nos propositions d'amélioration (FMaxSNR et CPF) ajustent les priorités relatives des flux en considérant les positions relatives de chacun. Le WFO réalise quant à lui cet ajustement en fonction des retards subis par chaque flux. Ces trois ordonnanceurs retardent légèrement les paquets des mobiles proches dont la QoS est facile à satisfaire et utilisent la marge de manœuvre ainsi offerte pour aider les mobiles plus éloignés. Cela permet d'une manière générale, en évitant des accumulations démesurées de paquets dans les files d'attente, de réduire les valeurs moyennes de temps d'attente et de gigue (figures 6.5(a) et 6.5(b)).

Efficacité Spectrale :

Pour terminer l'analyse de ce premier scénario, nous allons maintenant étudier quel est le prix à payer en termes de débit pour le gain d'équité et de QoS qu'offrent nos trois propositions d'algorithme. Avant d'en venir aux résultats, il est important de comprendre qu'une allocation optimale des URs ne peut se faire sans prendre en compte la variabilité des flux et les phénomènes d'attente. En effet, autant les $m_{k,n}$ fournissent une information efficace et pertinente pour réaliser une allocation offrant un haut débit théorique à court terme, autant ils ne peuvent pas garantir, seuls, le meilleur ordonnancement possible à moyen et long terme. Les algorithmes opportunistes classiques tels que le MaxSNR et le PF n'utilisent pourtant que ces paramètres. Adaptant dynamiquement la modulation et le codage, ils permettent souvent de faire un usage extrêmement efficace de la ressource radio en s'approchant même, dans les meilleurs cas, de la limite de Shannon. Il est d'ailleurs souvent considéré qu'ils maximisent l'efficacité des transmissions d'un point de vue purement théorique. Cependant, pour arriver à cette conclusion, il est supposé que les utilisateurs qui ont les meilleures conditions radio et donc qui se voient sélectionnés ont toujours des données à transmettre à l'instant considéré. Or, dans un contexte réaliste, cette hypothèse est erronée et lorsque le mobile qui a le meilleur canal n'a rien à transmettre ou à recevoir, les ordonneurs opportunistes classiques doivent en pratique allouer la ressource à des mobiles qui ont alors une efficacité spectrale moindre. L'allocation est alors sous-optimale puisqu'une allocation antérieure vers ces « seconds choix » se serait souvent révélée plus bénéfique (en offrant de meilleurs $m_{k,n}$). Ainsi, contrairement à l'idée largement répandue, le MaxSNR et le PF ne permettent pas, hormis sur le court terme, de tirer le meilleur parti de la bande passante. Il est en effet préférable d'allouer une UR à un flux qui a un bon état des liens (sans être nécessairement le meilleur) si cela permet de conserver un nombre maximal d'utilisateurs actifs, plutôt que d'allouer l'UR à l'utilisateur offrant la meilleure « rentabilité » à court terme au risque de se retrouver ultérieurement en manque de diversité multi-utilisateurs et donc d'altérer l'efficacité de l'allocation opportuniste sur le moyen/long terme. Nos propositions, via l'ajout de critères supplémentaires aux $m_{k,n}$ dans le processus d'allocation, permettent de mieux gérer les phénomènes d'attente et de conserver davantage de mobiles actifs au cours du temps. Nous verrons qu'au final, il en résulte une meilleure utilisation de la bande passante, plus opportuniste et plus efficace.

Nous allons tout d'abord commencer par analyser la capacité des ordonneurs à utiliser efficacement la bande passante. Nous considérons qu'une unité de ressource est « gâchée » lorsque l'ordonneur n'arrive à l'allouer à aucun mobile. C'est le cas lorsque tous les mobiles actifs subissent de grosses atténuations liées aux multi-trajets sur une sous-porteuse et que tous les ordres de modulation possibles échouent à satisfaire la cible de taux d'erreur (le débit possible est alors nul). La figure 6.6(a) montre les pourcentages

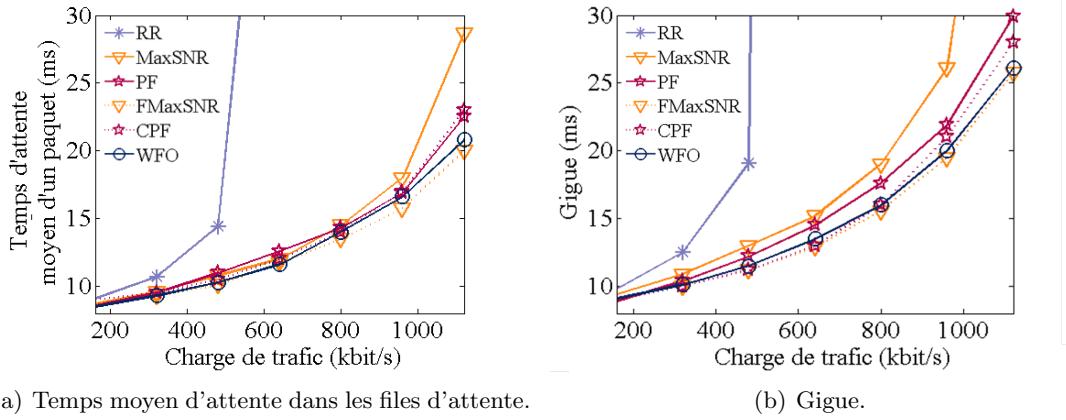


FIG. 6.5 – Temps moyen d'attente et gigue.

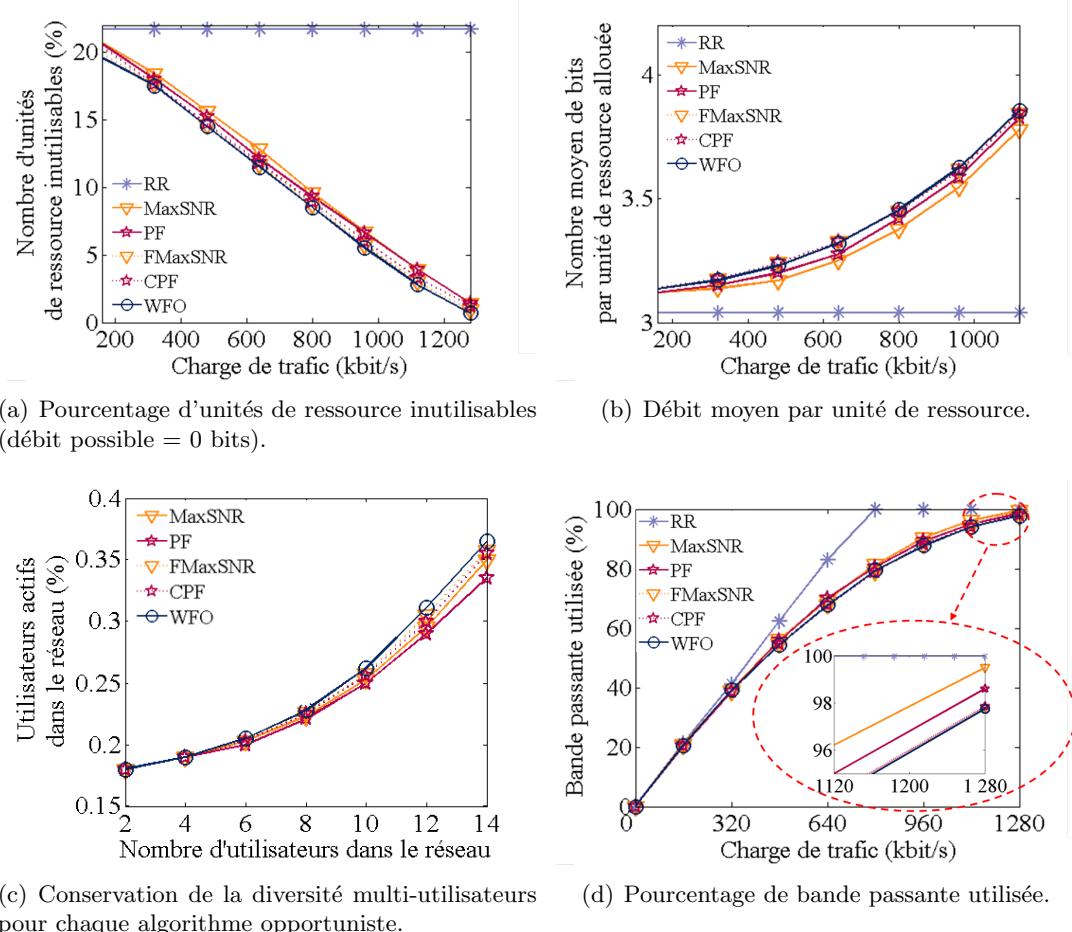


FIG. 6.6 – Analyse des performances des ordonneateurs en termes d'efficacité spectrale.

d'unités de ressource qui sont gâchées sur le nombre total d'unités de ressource considérées dans le processus d'allocation. Ces résultats donnent une bonne idée de la part de bande passante que les ordonnanceurs n'arrivent pas à exploiter. Avec le RR qui ne tire pas profit de la diversité multi-utilisateurs, un taux de bande passante inexploitable extrêmement élevé et constant est observé quelle que soit la charge de trafic. En effet, ne prenant pas en compte les CSIs lors de l'allocation des ressources, il effectue de manière régulière et constante de mauvaises allocations qui débouchent sur des débits nuls. Au contraire, les autres ordonnanceurs mettent à profit l'augmentation du nombre d'utilisateurs quand la charge augmente : plus il y a de mobiles actifs, plus large est le choix entre mobiles dans leur processus d'allocation et plus il leur est possible de trouver un mobile qui permet d'éviter de gâcher la ressource (avec un affaiblissement lié aux multi-trajets raisonnable).

La figure 6.6(b) montre ensuite le nombre de bits supportés en moyenne sur une unité de ressource utilisée, pour chaque ordonnanceur et pour différentes charges de trafic. Comme attendu, l'algorithme non opportuniste Round Robin procure un débit moyen bas et constant quelle que soit la charge sur le réseau. D'une part, il ne profite pas de la diversité multi-utilisateurs ce qui l'empêche d'améliorer ses performances avec l'augmentation des utilisateurs, d'autre part sa stratégie d'allocation ne tient pas compte des états des liens ce qui conduit à des allocations généralement sous-optimales offrant au final de faibles débits. Contrairement au Round Robin, avec les ordonnanceurs opportunistes, on peut observer une inflection (caractéristique) des courbes de débit lorsque la charge augmente. Le supplément de diversité multi-utilisateurs est alors mis à profit dans le processus d'allocation ce qui aboutit à une augmentation significative du débit global. En effet, plus il y a d'utilisateurs, plus il est probable que ces ordonnanceurs trouvent de bon couple « UR, mobile ». L'analyse jointe des résultats de la figure 6.6(b) et 6.6(c) met d'ailleurs en exergue ce lien fort qui existe entre l'augmentation de l'efficacité spectrale obtenue par les ordonnanceurs opportuniste et le nombre de mobiles actifs dans le réseau.

Un résultat complémentaire permet de renforcer ce constat. La figure 6.6(d) montre en effet le pourcentage de bande passante consommée par rapport à la quantité totale disponible (i.e. somme des pourcentages des URs utilisées et gâchées dans les divers processus d'allocation divisée par le nombre total d'URs disponibles). Alors que le réseau utilisant le RR se trouve rapidement saturé lorsque la charge augmente, les réseaux employant les ordonnanceurs opportunistes augmentent très largement leur capacité en supportant une charge de trafic quasiment deux fois supérieure (1280 kbit/s) et qui est en outre très proche de la limite atteignable (1600 kbit/s).

Un autre résultat important doit être mis en exergue : en observant attentivement la figure 6.6(d), on peut constater que le FMaxSNR, le CPF et le WFO sont plus efficaces que le MaxSNR et le PF. Ils gardent en effet plus de bande passante disponible pour ac-

cueillir d'éventuels utilisateurs supplémentaires. Tout en assurant une certaine équité, ils font moins de gâchis (cf. figure 6.6(a)), procurent une meilleure efficacité spectrale (cf. figure 6.6(b)) et, à la plus haute charge de trafic testée (1280 kbit/s), consomment environ 1,5 % moins d'unités de ressource que le MaxSNR pourtant reconnu comme la référence des ordonnanceurs opportunistes en termes de maximisation des débits système (figure 6.6(d)). Cela montre que le gain d'équité qu'ils procurent n'a aucun coût en terme de maximisation du débit. Cela peut s'expliquer simplement comme suit. Si on schématise l'allocation MaxSNR, dans un premier temps, les unités de ressource sont allouées uniquement entre les utilisateurs proches du point d'accès car, statistiquement, au moins l'un d'entre eux aura toujours un meilleur $m_{k,n}$ que les mobiles éloignés. D'une manière générale, l'algorithme MaxSNR ne commencera à servir les mobiles éloignés qu'une fois tous les mobiles proches complètement servis et inactifs. En agissant ainsi, tout se passe finalement comme si le MaxSNR ne profitait en permanence que d'une partie de la diversité multi-utilisateurs (la moitié dans ce scénario), ce qui lui fait perdre en opportunisme et donc en efficacité. Contrairement au MaxSNR, nos propositions harmonisent d'une manière homogène la taille des files d'attente (cf. figure 6.4) et gardent sensiblement plus de mobiles actifs au cours du temps (cf. figure 6.6(c)). En considérant réellement tous les utilisateurs actifs à un instant donné pour attribuer les ressources, elles préservent mieux la diversité multi-utilisateurs et en tirent un meilleur bénéfice. Cela permet, tout en apportant de l'équité dans le système à long mais aussi à court terme [108, 109], de garder de très hauts débits par UR, supérieurs aux standards actuels (cf. figure 6.6).

6.3.2 Contexte mobile

Dans le scénario précédent, les utilisateurs étaient statiques et placés à deux positions distinctes du point d'accès. L'objectif était de comparer les comportements des ordonnanceurs et d'étudier leur capacité à garantir de l'équité. Dans le but de fournir un complément d'analyse, nous nous plaçons maintenant dans un contexte plus général qui inclut une mobilité intracellulaire⁶. Nous avons constitué deux groupes composés de 7 mobiles qui se déplacent à travers la cellule en suivant le modèle décrit dans les figures 6.7 et 6.8. Chaque mobile utilise une même application de type vidéoconférence (seuil de retard maximum toléré T_k égal à 80 ms, débit souhaité égal à 80 kbit/s) et possède une vitesse de 3 km/h. De plus, la taille de la cellule est fixée à 5 km ($3 d_{ref}$). Quand un groupe s'approche du point d'accès, le scénario est conçu pour que l'autre groupe s'en éloigne afin de favoriser une observation claire des comportements des ordonnanceurs.

⁶Les performances du Round Robin ne seront pas représentées ici car un système implémentant le RR n'est pas capable de supporter la charge de trafic générée par ce scénario. Les performances du FMaxSNR et du CPF sont quant à elle très proches de celles du WFO mais par souci de lisibilité sur les graphiques nous avons choisi de ne pas les montrer.

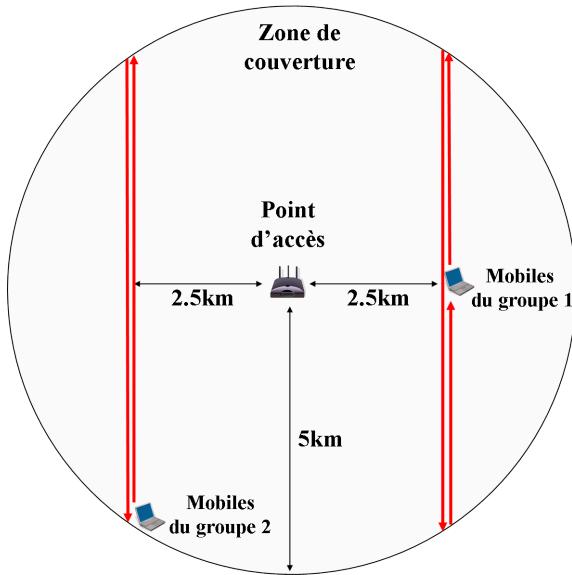


FIG. 6.7 – Modèle de mobilité intracellulaire.

En considérant le *path loss*, le *multipath fading* et le modèle de mobilité intracellulaire, nous avons calculé pour chaque groupe de mobiles (figure 6.9) l'évolution du nombre de bits pouvant être transmis en moyenne sur une unité de ressource. Cela met en évidence l'importance de l'impact de la position des mobiles sur leur $m_{k,n}$ moyen. La figure 6.10 rapporte quant à elle le nombre moyen de bits par unité de ressource « allouée » pour chaque groupe de mobiles. Les résultats mettent en exergue la capacité des ordonneurs à tirer avantage de la diversité multi-utilisateurs pour maximiser l'efficacité spectrale du système. Avec les ordonneurs opportunistes, une unité de ressource est allouée seulement lorsque l'état du canal qui lui est associé est bon et donc uniquement lorsque le nombre de bits pouvant y être transmis est grand. Cela conduit généralement à transmettre à un débit supérieur à celui qu'il est possible d'obtenir en moyenne et procure donc un haut débit global. Ainsi, dans ce scénario, les ordonneurs opportunistes permettent d'allouer un nombre de bits par unité de ressource compris entre 3 et 5 (figure 6.10) alors que la capacité « moyenne » d'une unité de ressource varie elle de 1.8 à 3.5 seulement⁷ (figure 6.9). Cela confirme les résultats de la figure 6.6(b) : les ordonneurs opportunistes procurent une forte augmentation des débits comparé aux algorithmes classiques et le WFO obtient des résultats légèrement supérieurs.

En termes d'équité, la figure 6.11 montre le retard moyen subi par chaque paquet et pour chaque groupe de mobiles au cours du temps. On peut y voir aisément et à nouveau que le MaxSNR est très largement inéquitable. En effet, dès que les mobiles s'éloignent

⁷Notons que ces valeurs seraient celles des débits obtenus avec le RR.

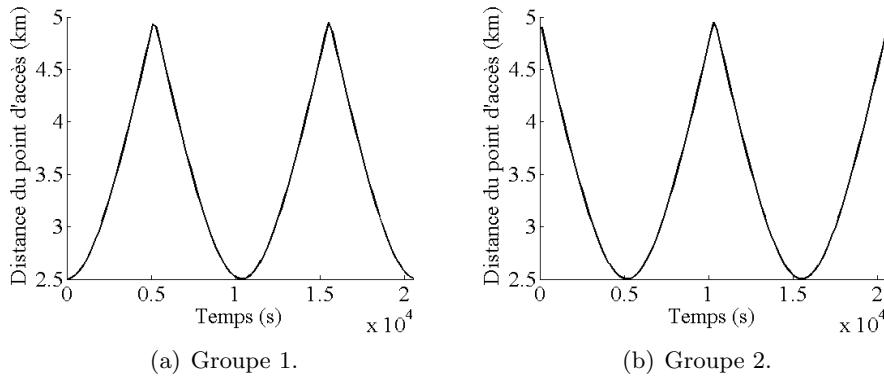


FIG. 6.8 – Position des mobiles au cours du temps.

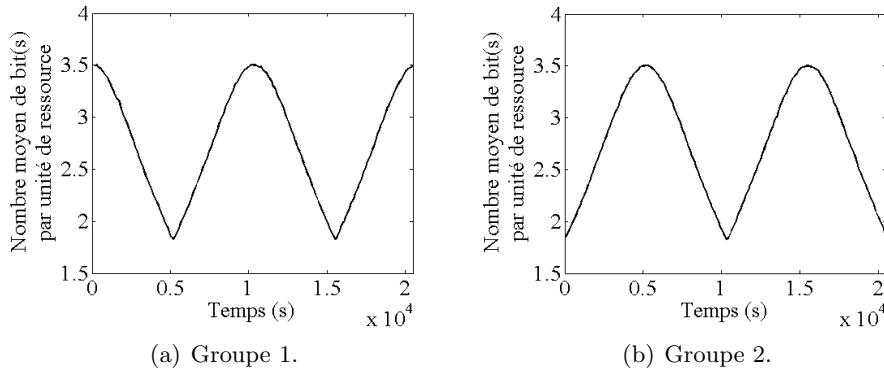


FIG. 6.9 – Nombre moyen de bits qui peuvent être transmis sur une unité de ressource au cours du temps, pour chaque groupe de mobiles.

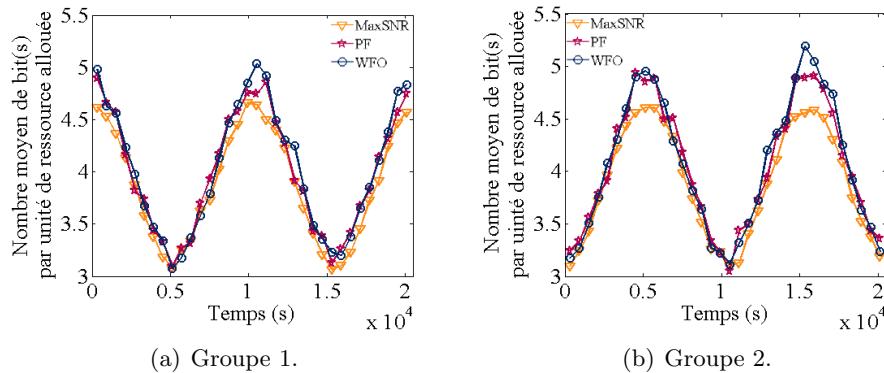


FIG. 6.10 – Nombre moyen de bits qui sont transmis sur une unité de ressource au cours du temps, pour chaque groupe de mobiles.

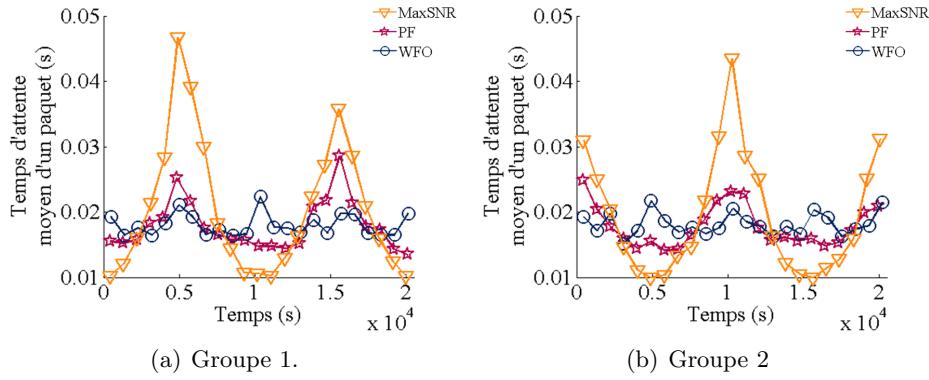


FIG. 6.11 – Attente moyenne des paquets au cours du temps.

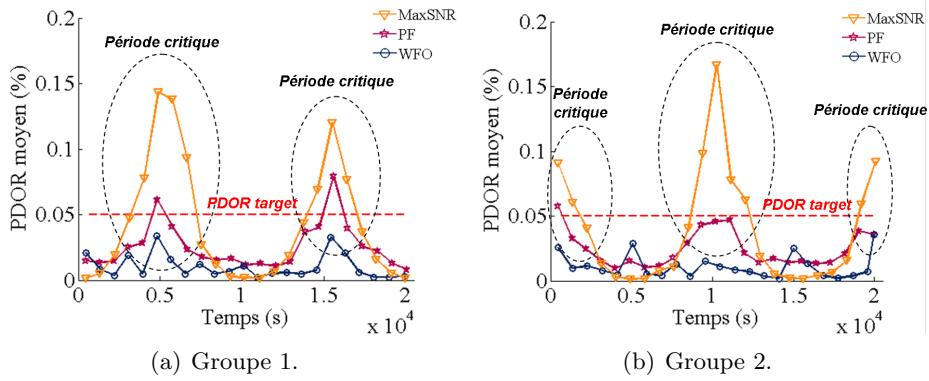


FIG. 6.12 – Variation des valeurs de PDOR au cours du temps.

du point d'accès, ils se mettent à subir d'immenses retards. Le PF, lui, offre de meilleurs résultats et permet d'atténuer l'ampleur des pics de retards. Le WFO est cependant le plus efficace dans ce « lissage » des pics de retards. En allouant continuellement les priorités de manière adéquate et juste en fonction des déplacements des mobiles à travers la cellule, il répartit les ressources entre eux de manière à ce qu'aucun flux ne subisse de période critique.

Pour finir, la figure 6.12 montre les pourcentages moyens de paquets arrivés hors délai (PDOR) pour chaque groupe de mobiles au cours du temps. La comparaison des figures 6.11 et 6.12 permet d'observer l'importante corrélation qui existe entre retard moyen et PDOR moyen. En effet, réduisant l'ampleur des pics de retard, le PF améliore la qualité de service des mobiles comparé au MaxSNR. Le WFO démultiplie cet effet en ajustant en permanence les priorités données aux mobiles. Il autorégule en quelque sorte les PDORs du système de manière dynamique : lorsque qu'un mobile subit une période critique (PDOR élevé), sa priorité augmente, ce qui a tendance à lui attribuer davantage d'URs et à diminuer son

PDOR ; lorsqu'un mobile obtient une QoS supérieure à sa demande (PDOR très faible), sa priorité diminue et des unités de ressource lui sont en quelque sorte « prélevées » pour aider le système. À terme, tous les PDORs fluctuent autour d'une valeur commune empêchant les dégradations subites de QoS. Ces résultats montrent la nature extrêmement équitable du WFO qui satisfait tous les mobiles à un même niveau quels que soient leurs déplacements dans la zone de couverture du point d'accès.

6.3.3 Bilan

Lors de cette première analyse, il a été mis en évidence que, dans un contexte où les utilisateurs sont positionnés à des distances différentes du point d'accès, le RR, le MaxSNR et le PF sont extrêmement inéquitables et privilégient de manière systématique les utilisateurs proches du point d'accès. Au contraire, le FMaxSNR, le CPF et le WFO procurent un même PDOR à chacun quelle que soit sa position. Ils garantissent ainsi une équité et un niveau global de qualité de service bien plus élevé.

Ces résultats illustrent d'une manière plus générale le gain significatif en termes de débit que permet l'utilisation d'ordonnanceurs opportunistes, la capacité des systèmes pouvant en effet être quasiment doublée par rapport aux ordonnanceurs classiques. Dans ce domaine, on peut d'ailleurs noter que le FMaxSNR, le CPF mais surtout le WFO obtiennent les meilleures performances, ce qui permet de s'affranchir du supposé nécessaire compromis entre équité et débit.

6.4 Second scénario : trafics hétérogènes

Ce scénario est décomposé en deux sous-parties qui ont chacune pour vocation d'analyser l'aptitude des ordonneurs à procurer une différenciation de service efficace. À présent, les utilisateurs sont tous situés à une même distance du point d'accès et nous observons les différences de traitement entre groupes d'utilisateurs ayant des besoins différents, tout d'abord en termes de débit, puis en termes de délai. Dans ces configurations, nous verrons que le FMaxSNR et le CPF montrent tous les deux leurs limites. Ils ne gèrent en effet que l'aspect « distance » et lorsque les mobiles sont tous positionnés en un même lieu, leurs algorithmes (et donc leurs performances) ne diffèrent pas du MaxSNR (pour le FMaxSNR) et du PF (pour le CPF). Notons également que les performances du RR ne lui permettant pas de supporter les configurations testées ci-dessous, il ne sera plus évoqué.

6.4.1 Sources à besoins différents en termes de débit

Dans ce sous-scénario, les utilisateurs sont toujours répartis en deux groupes mais qui se distinguent désormais par la quantité de données que chacun demande à recevoir : les

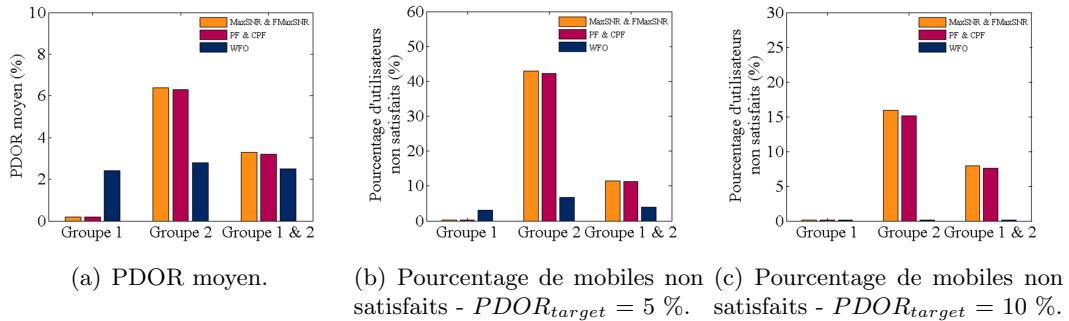


FIG. 6.13 – QoS mesurée dans un contexte où les sources ont des exigences différentes en termes de débit.

mobiles du premier groupe demandent un débit de 80 kbit/s et les mobiles du second un débit trois fois plus élevé (cf. tableau 6.2).

TAB. 6.2 – Scénario 2.1 : paramétrage du scénario avec sources à besoins différents en termes de débit.

Groupe	Nombre de mobiles	Distance d_k	Retard maximum toléré T_k	Débit souhaité
1	9	1.6 d_{ref}	80 ms	80 kbit/s
2	3	1.6 d_{ref}	80 ms	240 kbit/s

Dans ce scénario, toutes les stratégies d’allocation opportunistes procurent une efficacité spectrale comparable avec un taux d’utilisation de la bande passante de 82 %. En revanche, les résultats concernant la qualité de service fournie aux utilisateurs diffèrent considérablement comme le montre la figure 6.13(a).

Les résultats mettent en évidence que le MaxSNR, le FMaxSNR, le PF, et le CPF respectent facilement les contraintes de délai des mobiles à faible débit mais échouent à satisfaire les mobiles du second groupe plus exigeants. La principale faiblesse de ces algorithmes est qu’ils ne prennent pas en compte les besoins des utilisateurs lors de l’attribution des URs. En conséquence, il leur est impossible d’assurer une quelconque différenciation de service ce qui, à terme, empêche d’assurer une QoS raisonnable pour tous dans le réseau.

Au contraire, le WFO, via les PDORs, tient implicitement compte des besoins des utilisateurs (cf. section 5.2.2). Cela lui permet de différencier efficacement les services et d’attribuer à chacun une part juste de bande passante en fonction de ses demandes. Cela assure à tous les mobiles un même taux de satisfaction quels que soient les profils de trafic considérés, garantissant ainsi une équité de niveau 3 (cf. figures 6.13(b) et 6.13(c)) et une amélioration substantielle de la QoS par rapport aux autres ordonnanceurs opportunistes.

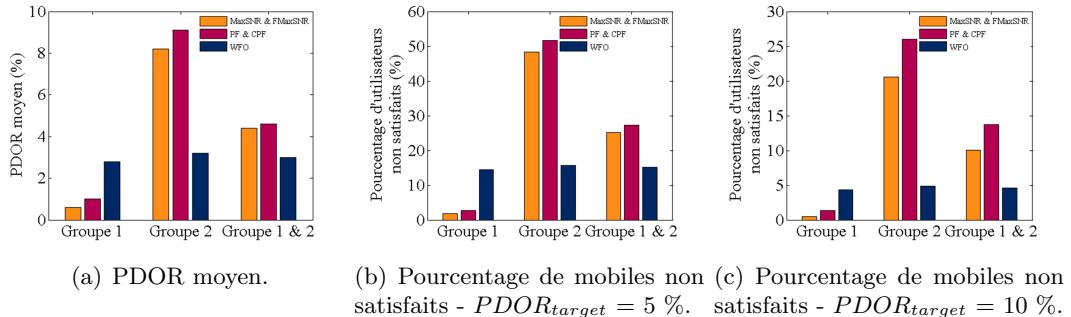


FIG. 6.14 – QoS mesurée dans un contexte où les sources ont des contraintes temporelles différentes à respecter.

6.4.2 Sources à contraintes de retard différentes

Nous étudions ici le contexte où les utilisateurs sont tous situés à une même distance du point d'accès, requièrent un même débit mais ont des contraintes de temps différentes à respecter : 80 ms pour les utilisateurs du premier groupe, 250 ms pour les autres (cf. tableau 6.3).

TAB. 6.3 – Scénario 2.2 : paramétrage du scénario avec sources à contraintes de retard différentes.

Groupe	Nombre de mobiles	Distance d_k	Retard maximum toléré T_k	Débit souhaité
1	7	$2,7 d_{ref}$	80 ms	80 kbit/s
2	7	$2,7 d_{ref}$	250 ms	80 kbit/s

La figure 6.14 montre clairement que grâce à son système de poids qui contrôle dynamiquement les retards de chaque flux, le WFO assure, comme dans le sous-scénario précédent, une qualité de service homogène et élevée entre les deux groupes de mobiles. En basant l'attribution des priorités sur les taux d'urgence à être servi représentés par les PDORs, l'allocation réalisée est plus opportuniste, ce qui aboutit à des taux d'insatisfaction moyen plus faible qu'avec les autres ordonnanceurs. Les PDORs sont donc utilisés mais aussi régulés de manière efficace via l'allocation du WFO, ce qui procure une différenciation de service très élevée et permet au WFO d'obtenir des résultats qui surpassent largement tous les autres ordonnanceurs.

6.5 Troisième scénario : analyse globale des performances des ordonnanceurs

Précédemment nous avons étudié le comportement des ordonnanceurs dans des contextes simples en observant à chaque sous-scénario l'impact d'un seul paramètre sur leurs performances. Dans le but de corroborer les résultats obtenus dans un contexte plus large, nous allons analyser à présent les performances des ordonnanceurs en faisant varier simultanément tous les paramètres étudiés. Huit groupes de mobiles sont constitués. Ils diffèrent en fonction de la proximité relative des utilisateurs du point d'accès, du débit qu'ils requièrent et du seuil de retard que leurs paquets ne doivent pas dépasser tels que décrits dans le tableau 6.4.

TAB. 6.4 – Troisième scénario : contexte global.

Groupe	Nombre de mobiles	Distance d_k	Retard maximum toléré T_k	Débit souhaité
1	2	$2 d_{ref}$	80 ms	80 kbit/s
2	1	$2 d_{ref}$	80 ms	160 kbit/s
3	2	$2 d_{ref}$	250 ms	80 kbit/s
4	1	$2 d_{ref}$	250 ms	160 kbit/s
5	2	$2.4 d_{ref}$	80 ms	80 kbit/s
6	1	$2.4 d_{ref}$	80 ms	160 kbit/s
7	2	$2.4 d_{ref}$	250 ms	80 kbit/s
8	1	$2.4 d_{ref}$	250 ms	160 kbit/s

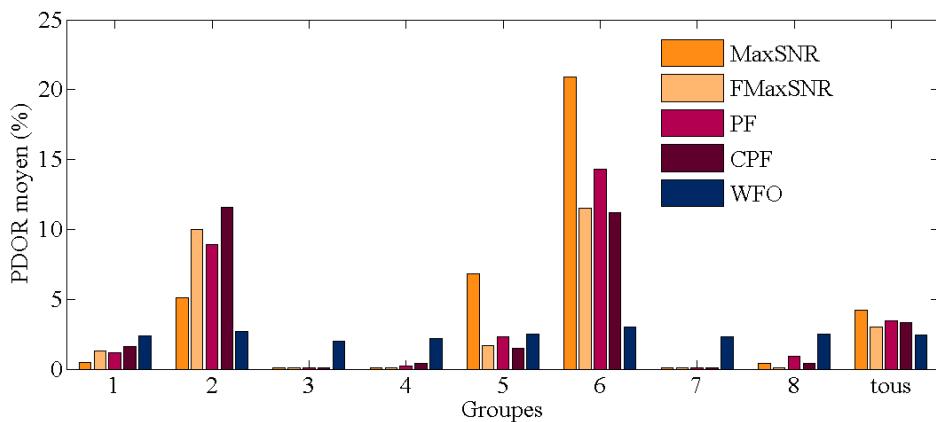
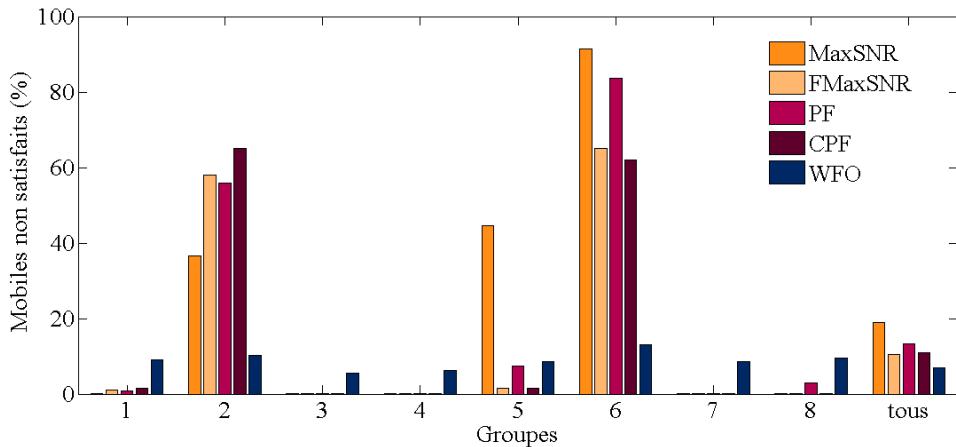
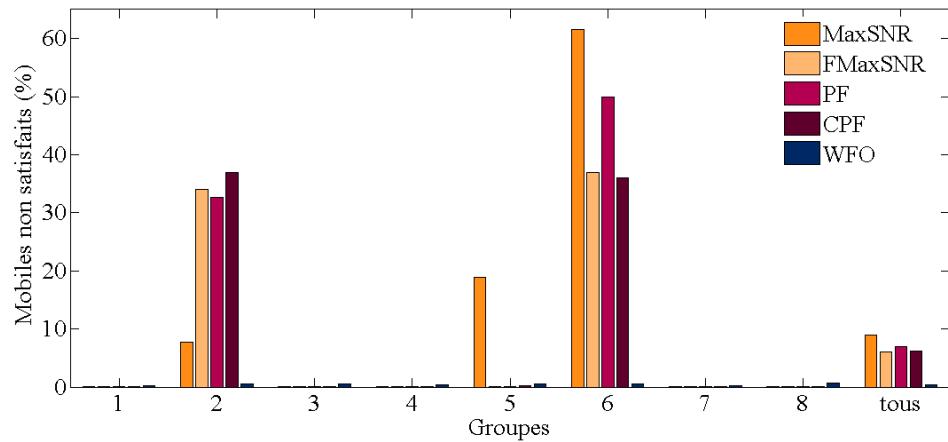


FIG. 6.15 – PDOR moyen.

Les figures 6.15, 6.16 et 6.17 montrent respectivement les taux de paquets arrivés hors délai et les taux de mobiles insatisfaits avec un $PDOR_{target}$ de 5 % et 10 %, ceci pour chaque groupe de mobiles puis tous groupes confondus (sur la droite). Ces résultats montrent tout

FIG. 6.16 – Pourcentage de mobiles non satisfaits lorsque $PDOR_{target} = 5\%$.FIG. 6.17 – Pourcentage de mobiles non satisfaits lorsque $PDOR_{target} = 10\%$.

d'abord que le MaxSNR procure ici encore une QoS très dégradée, en particulier lorsque les contraintes de retard sont difficiles à respecter, les mobiles éloignés du point d'accès et/ou lorsque les débits demandés sont supérieurs à la moyenne (c'est à dire pour les groupes 2, 5 et 6). D'une manière générale, le MaxSNR ne gère finalement de manière correcte que les utilisateurs proches du point d'accès et à faibles besoins. Cela confirme que cet ordonnanceur est très largement inéquitable et peu performant dans un contexte réaliste.

Avec le PF, on peut remarquer que la position des mobiles a moins de conséquences sur les performances. Cependant, de grandes inégalités persistent surtout pour les groupes 2 et 6 qui ont des contraintes de QoS strictes.

Cette dernière analyse de performances montre également que le FMaxSNR et le CPF

offrent quant à eux une égalité de traitement quasiment parfaite entre les mobiles quelle que soit leur position en compensant les effets néfastes du *path loss* sur le résultat des allocations. Sur ce point, ils apportent une réelle amélioration par rapport aux ordonneurs d'origine même si tous les problèmes ne sont pas résolus. En effet, les inégalités engendrées par l'impossibilité de différencier les services demeurent et les groupes 2 et 6, aux exigences élevées, restent largement pénalisés.

Les résultats du WFO sont quant à eux, encore ici, particulièrement intéressants. Celui-ci procure en effet un multiplexage efficace des flux qu'il gère de manière à tous les satisfaire dans les mêmes proportions et ce quelles que soient leurs contraintes temporelles, leurs débits ou leurs positions. Le WFO permet ainsi de garder des PDORs relativement bas pour tous contrairement aux autres algorithmes opportunistes. Cela permet *in fine* de satisfaire le plus grand nombre avec équité.

6.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les performances de nos contributions (FMaxSNR, CPF et WFO) et nous les avons comparées à celles des deux ordonneurs opportunistes les plus connus (MaxSNR et PF) et à l'ordonnanceur classique le plus courant dans la littérature (RR). Les résultats ont montré que les ordonneurs peuvent être classés dans un ordre croissant de performance.

Le moins performant est le Round Robin. Les résultats ont clairement démontré que cet ordonneur n'est pas réellement équitable (pas d'équité supérieure au niveau 1 comme l'indique la figure 6.1(a)). Il est de plus incapable de maximiser le débit du réseau et offre des débits bien inférieurs à ceux procurés par les ordonneurs opportunistes (cf. section 6.3.1, figure 6.6).

Le MaxSNR et le PF viennent ensuite. Ces deux ordonneurs opportunistes bien connus tiennent compte des états des liens et parviennent à augmenter significativement le débit global du système. Cependant, traitant tous les flux sans distinction, ils ne procurent aucune différenciation de service et en conséquence, ne garantissent aux mobiles qu'une QoS faible et inéquitablement répartie.

Le FMaxSNR et le CPF apportent une amélioration à ces deux standards d'allocation de ressources opportunistes. Avec leur système de compensation, ils anticipent les effets désastreux du *path loss* sur l'équité. Les flux des utilisateurs proches du point d'accès (bénéficiant d'une bonne efficacité spectrale) sont retardés avec parcimonie ce qui permet de favoriser les mobiles plus éloignés (qui nécessitent plus d'attention pour respecter leurs contraintes temporelles). En ajustant ainsi les différentes priorités entre mobiles, l'équité est améliorée en atteignant, respectivement pour le FMaxSNR et le CPF, le niveau 1 et 2.

De plus, en conservant un plus grand nombre d'utilisateurs actifs au cours du temps, ils permettent une meilleure gestion de la diversité multi-utilisateurs et la capacité du système reste maximisée.

L'ordonnanceur présentant les meilleures performances est le WFO. Dans une approche inter-couches étendue (de la couche applicative à la couche physique), les priorités sont attribuées dynamiquement et de manière adéquate en tenant compte des conditions radio et de l'urgence pour les flux à être servis. Cette double stratégie s'avère très rentable. Via son système de poids basé sur les PDORs, il prend en compte de multiples aspects générant habituellement des problèmes d'équité et de QoS tels la distance séparant les mobiles du point d'accès, les débits requis ou encore la variabilité des flux... Ces derniers se répercutent en effet implicitement sur les valeurs de PDOR et sont donc pris en compte dans le processus d'allocation. Ainsi une équité de haut niveau et une différenciation de service élaborée sont assurées. De plus, conservant encore mieux la diversité multi-utilisateurs que le FMaxSNR et le CPF, le WFO bénéficie toujours d'un choix plus grand entre mobiles dans le processus d'allocation, ce qui lui permet de tirer le meilleur bénéfice de l'approche opportuniste. Le WFO offre ainsi de très hauts débits sensiblement supérieurs à ceux offerts par le MaxSNR pourtant reconnu comme la référence dans ce domaine. Cela aboutit à une attribution des priorités très efficace : quel que soit le scénario étudié, le WFO est le seul à garantir différenciation de service, équité de niveau 3 et maximisation du débit permettant au final de fournir avec succès des services multimédia évolués (enjeu majeur des systèmes sans fil 4G).

Chapitre **7**

Conclusion

7.1	Synthèse des contributions	102
7.2	Perspectives	102
7.3	Publications	105
7.3.1	Journal international avec comité de lecture	105
7.3.2	Chapitres de livres	105
7.3.3	Actes de conférences internationales avec comité de lecture	105
7.3.4	Rapports techniques	106

7.1 Synthèse des contributions

Les travaux de recherche présentés dans cette thèse se focalisent essentiellement sur le problème complexe de l'allocation de ressources opportuniste dans les réseaux sans fil utilisant la technologie OFDM. Allouer de manière optimale la ressource radio est en effet un challenge majeur pour l'essor de l'internet moderne sans fil. Il s'agit de concilier au mieux les contraintes des couches physique et applicative afin d'offrir les meilleurs débits avec la plus haute QoS possible.

Dans le chapitre 3, nous avons proposé tout d'abord un outil de mesure de la QoS dans les réseaux : le PDOR. Grâce à ce dernier, la capacité des ordonnanceurs à respecter des contraintes applicatives de tout type peut être mesurée et comparée de façon générique quel que soit le contexte, ce qui permet de faciliter considérablement l'évaluation de performances.

Dans le chapitre 4, nous avons ensuite proposé deux améliorations de deux ordonneurs opportunistes reconnus. Ces dernières permettent de résoudre une partie des problèmes rencontrés avec les versions d'origine. Leur avantage majeur est d'homogénéiser la qualité de service de tous les utilisateurs du réseau quelle que soit leur distance au point d'accès et ce sans nuire au débit global du système. La mobilité intracellulaire des utilisateurs est donc mieux gérée en leur offrant une connectivité de qualité constante en tout point.

Ces deux propositions n'ont constitué qu'un premier pas dans notre recherche. En effet, notre objectif final a été tout au long de cette thèse de développer un algorithme d'allocation de ressources « optimal » capable d'apporter maximisation du débit global, équité de haut niveau et différenciation de service. Opportuniste, équitable et basé sur un système de poids, cet ordonneur est appelé *Weighted Fair Opportunistic* (WFO). Présenté dans le chapitre 5, le WFO est compatible avec les standards actuels comme le 802.16 et permet de s'affranchir du compromis « débit/équité » illustré dans la figure 7.1.

Dans le chapitre 6, nous avons présenté en dernier lieu nos études d'évaluation de performances. Celles-ci ont démontré, dans tous les scénarios testés, que le WFO surpasse très largement les standards actuels et cela pour de multiples critères : retard des paquets, gigue, débits fournis, équité, QoS...

Cette thèse aboutit donc à la création d'un nouvel ordonneur très efficace, capable de supporter avec une QoS élevée les services multimédia des réseaux sans fil modernes.

7.2 Perspectives

Plusieurs pistes pourraient être explorées. Tout d'abord, il serait intéressant d'étudier les avantages que pourrait procurer le WFO pour la gestion communautaire. Nous avons

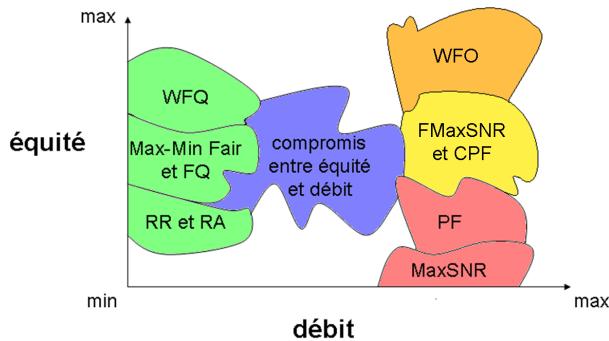


FIG. 7.1 – Résolution, via le WFO, du compromis : équité VS débit.

en effet identifié un besoin dans ce domaine. L’objectif serait de proposer un ordonnanceur capable d’avantager les utilisateurs qui participent au bon fonctionnement du réseau et de pénaliser éventuellement les autres. Outres ses avantages en termes de maximisation du débit, d’équité et de différenciation de service, le WFO permettrait d’attribuer simplement, de manière fixe ou variable des « priorités communautaires ». Ces dernières pourraient par exemple être accordées, dans une première approche, en faisant varier pour chaque utilisateur la valeur du paramètre β .

Le contrôle d’admission étant essentiel pour garantir la QoS dans le réseau, une autre perspective de recherche serait de proposer une solution à cette problématique particulière grâce à l’utilisation des PDORs, voire du WFO. En effet, lorsque qu’un utilisateur souhaite être admis dans une cellule, le point d’accès pourrait examiner le niveau moyen de QoS qui y règne (cela via la moyenne des PDORs des flux). En se basant sur un seuil, le point d’accès pourrait alors prendre la décision d’accepter ou de refuser un flot. A titre d’exemple, dans nos nombreuses simulations, nous avons pu remarquer de manière répétée que lorsque la moyenne des PDORs dépassait la valeur de 5 à 10 %, l’ajout d’un flot, même peu gourmand, dégradait significativement la QoS de tous les utilisateurs. Notre idée première serait donc de proposer un contrôle d’admission en complément du WFO de manière à ce que, lorsque la moyenne des PDORs dépasse un certain seuil, tous les nouveaux flux soient refusés. Il nous serait également possible d’incorporer dans le WFO une fonctionnalité permettant la détection d’un flux qui serait trop gourmand une fois accepté en se basant sur l’historique du nombre d’unités de ressources allouées. Il serait alors possible de pénaliser ce flux en modifiant sa priorité afin de le contraindre à diminuer voire stopper son trafic si cela finissait par nuire à la QoS globale du réseau.

Une autre piste restée en suspens mais qui mériterait d’être explorée serait d’étudier comment réaliser des algorithmes de routage utilisant l’approche opportuniste. Grâce à de tels systèmes et d’après nos premières recherches dans ce domaine, les débits dans les

réseaux de cœur pourraient être grandement augmentés. Cependant, il est pour l'instant impossible de s'assurer que les routeurs connaissent et maintiennent à jour une multitude d'états des liens tout en prenant des décisions de manière rapide. Malgré cette difficulté du passage à l'échelle, nous pensons avoir un début de réponse, orienté vers le routage opportuniste au saut par saut.

Pour terminer cette énumération non exhaustive de futurs projets de recherche, une perspective extrêmement intéressante que nous ouvre cette thèse et sur laquelle nous tenons particulièrement à travailler est l'économie d'énergie. En effet, pour la plupart des mobiles, il est primordial de minimiser la consommation d'énergie afin de conserver plus d'autonomie et donc de mobilité. Le WFO, avec quelques modifications en étude permettrait sans doute de proposer des solutions pertinentes.

7.3 Publications

7.3.1 Journal international avec comité de lecture

Cédric Gueguen et Sébastien Baey, *A Fair Opportunistic Access Scheme for Multiuser OFDM Wireless Networks*. Journal on Wireless Communications and Networking. European Association for Signal Processing (EURASIP). Special issue on « Fairness in Radio Resource Management for Wireless Networks », February 2009.

Cédric Gueguen et Sébastien Baey, *Influence of Bandwidth Granularity on OFDM Scheduler Performances*. Computer Communications, Elsevier (en cours de soumission).

7.3.2 Chapitres de livres

Cédric Gueguen et Sébastien Baey, *Opportunistic Access Schemes for Multiuser OFDM Wireless Networks*. Radio Communications, Chapter 14, Alessandro Bazzi (Ed.), ISBN : 978-953-307-091-9, In-Tech, April 2010.

Cédric Gueguen et Sébastien Baey, *Advanced Access Schemes for Future Broadband Wireless Networks*. Communications and Networking, Ana Nikolic (Ed.), ISBN : 978-953-7619-X-X, à paraître fin 2010.

7.3.3 Actes de conférences internationales avec comité de lecture

Cédric Gueguen et Sébastien Baey, *A Fair MaxSNR Scheduling Scheme for Multiuser OFDM Wireless Systems*. In Proc. IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Tokyo, Japan, September 2009.

Cédric Gueguen et Sébastien Baey, *Compensated Proportional Fair Scheduling in Multiuser OFDM Wireless Networks*. In Proc. fourth IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WIMOB), Avignon, France, October 2008.

Cédric Gueguen et Sébastien Baey, *Scheduling in OFDM Wireless Networks without Tradeoff between Fairness and Throughput*. In Proc. IEEE 68th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), Calgary, Alberta, Canada, September 2008.

Cédric Gueguen et Sébastien Baey, *Weighted Fair Opportunistic Scheduling for Multi-media QoS Support in Multiuser OFDM Wireless Networks*. In Proc. IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Cannes, France, September 2008.

Cédric Gueguen et Sébastien Baey, *An efficient and Fair Scheduling Scheme for Multiuser OFDM Wireless Networks*. In Proc. IEEE Wireless communications & Networking Conference (WCNC), Las Vegas, Nevada, USA, March 2008.

7.3.4 Rapports techniques

Deux rapports techniques ont été réalisés dans le cadre du projet européen WIP avec la participation de UPMC/LIP6, Thomson, Siemens, CTTC, INPG, IT, CERTH et Swisscom :

- *Design of the Lower Layer Techniques for WIP Advanced Wireless Infrastructure (Advanced MAC Techniques)*, 2007.
- *Performance Evaluation of the Lower Layer Techniques and Integration into the WIP Global Architecture*, 2007.

Liste des figures

1.1	Variation de la puissance du signal en fonction de la distance pour une fréquence donnée.	13
1.2	Canaux sélectifs en fréquence.	14
1.3	Illustration du problème engendré par une allocation équitable en termes de débit (niveau 2).	16
1.4	Allocation de ressources dans une approche centralisée.	21
1.5	Structure d'une trame OFDM.	22
2.1	Lien entre position des mobiles et débits moyens possibles.	27
2.2	Allocation Max-Min Fair.	30
2.3	Maximisation du débit via une allocation MaxSNR.	32
2.4	Problème d'inéquité induit par le positionnement géographique des utilisateurs.	33
2.5	Compromis entre équité et maximisation du débit.	38
3.1	Exemple de fonction de répartition des temps de retard des paquets d'un flux et illustration du PDOR.	46
4.1	Diagramme d'états-transitions du FMaxSNR et du CPF.	58
5.1	Calibration du paramètre de réactivité α et de normalisation β	72
5.2	Diagramme d'états-transitions de l'algorithme WFO.	73
6.1	QoS mesurée avec les différents ordonnanceurs.	81
6.2	Fonctions de répartition des valeurs de PDOR obtenues avec les différents ordonnanceurs.	83
6.3	Analyse du respect des contraintes de QoS pour différents seuils d'exigence.	84
6.4	Etat d'occupation des files d'attente.	85
6.5	Temps moyen d'attente et gigue.	87

6.6	Analyse des performances des ordonnanceurs en termes d'efficacité spectrale.	87
6.7	Modèle de mobilité intracellulaire.	90
6.8	Position des mobiles au cours du temps.	91
6.9	Nombre moyen de bits qui peuvent être transmis sur une unité de ressource au cours du temps, pour chaque groupe de mobiles.	91
6.10	Nombre moyen de bits qui sont transmis sur une unité de ressource au cours du temps, pour chaque groupe de mobiles.	91
6.11	Attente moyenne des paquets au cours du temps.	92
6.12	Variation des valeurs de PDOR au cours du temps.	92
6.13	QoS mesurée dans un contexte où les sources ont des exigences différentes en termes de débit.	94
6.14	QoS mesurée dans un contexte où les sources ont des contraintes temporelles différentes à respecter.	95
6.15	PDOR moyen.	96
6.16	Pourcentage de mobiles non satisfaits lorsque $PDOR_{target} = 5\%$.	97
6.17	Pourcentage de mobiles non satisfaits lorsque $PDOR_{target} = 10\%$.	97
7.1	Résolution, via le WFO, du compromis : équité VS débit.	103

Liste des tableaux

2.1	Classification qualitative des ordonnanceurs.	37
6.1	Scénario 1 : paramétrage des flux dans le modèle statique.	80
6.2	Scénario 2.1 : paramétrage du scénario avec sources à besoins différents en termes de débit.	94
6.3	Scénario 2.2 : paramétrage du scénario avec sources à contraintes de retard différentes.	95
6.4	Troisième scénario : contexte global.	96

Références

- [1] P. Ansel, Q. Ni, and T. Turletti, “FHCF : A fair scheduling scheme for 802.11e WLAN,” in *INRIA Research Report No 4883*, Jul. 2003.
- [2] M. Malli, Q. Ni, T. Turletti, and C. Barakat, “Adaptive fair channel allocation for QoS enhancement in IEEE 802.11 wireless LANs,” in *Proc. IEEE Int. Conf. on Communications (ICC)*, June 2004.
- [3] Y. Huang and R. Guérin, “Does over-provisioning become more or less efficient as networks grow larger ?,” in *Proc. IEEE Int. Conf. on Network Protocols (ICNP)*, November 2005.
- [4] C. Chaudet and I. Guérin Lassous, “Etat des lieux sur la qualité de service dans les réseaux ad hoc,” in *Colloque Francophone sur l’Ingénierie des Protocoles (CFIP’06)*, October 2006.
- [5] A. Goldsmith, *Wireless Communications*. Cambridge University Press, 2005.
- [6] J. Villalón, P. Cuenca, L. Orozco-Barbosa, Y. Seok, and T. Turletti, “Cross-layer architecture for adaptive video multicast streaming over multi-rate wireless LANs,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 25, no. 4, no. 4, pp. 699 – 711, May 2007.
- [7] J. G. Proakis, *Digital Communications*. 3rd ed. New York : McGraw-Hill, 1995.
- [8] R. Steele and L. Hanzo, *Mobile Communications*. IEEE Computer Society Press, 2000.
- [9] J. D. Parsons, *The Mobile Radio Propagation Channel*. Wiley, 1992.
- [10] A. Ahmed, W. Osman, and T. Rahman, “Orthogonal frequency division multiple acces system analysis using bit error rate,” in *Proc. Int. Conf. on Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies (NGMAST)*, pp. 211 –214, sept. 2009.
- [11] T. Hwang, C. Yang, G. Wu, S. Li, and Y. Li, “OFDM and its wireless applications : A survey,” *Proc. IEEE Int. Vehicular Technology Conference (VTC)*, vol. 58, no. 4, no. 4, pp. 1673 – 1693, May 2009.

- [12] T. Ali-Yahiya, A.-L. Beylot, and G. Pujolle, “An adaptive cross-layer design for multiservice scheduling in OFDMA based mobile WiMAX systems,” *Computer Communications, Elsevier*, vol. 32, no. 3, no. 3, pp. 531 – 539, Feb. 2009.
- [13] M. Pun, M. Morelli, and J. Kuo, “Synchronization techniques for orthogonal frequency division multiple access (OFDMA) : A tutorial review,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, no. 7, no. 7, pp. 1394–1427, July 2007.
- [14] D. Niyato and E. Hossain, “Radio resource management in MIMO-OFDM mesh networks : Issues and approaches,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 45, no. 11, no. 11, pp. 100–107, November 2007.
- [15] M. Özdemir and H. Arslan, “Channel estimation for wireless OFDM systems,” *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 9, no. 2, no. 2, pp. 18–48, 2007.
- [16] Y. G. Li, N. Seshadri, and S. Ariyavisitakul, “Channel estimation for OFDM systems with transmitter diversity in mobile wireless channels,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 17, no. 3, no. 3, pp. 461 – 471, March. 1999.
- [17] V. Jones and G. Raleigh, “Channel estimation for wireless OFDM systems,” in *Proc. IEEE Int. Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, vol. 2, pp. 980–985, 1998.
- [18] R. Vannier and I. Guérin Lassous, “Partage équitable de la bande passante dans les réseaux ad hoc,” in *Proc. on Colloque Francophone sur l’Ingénierie des Protocoles (CFIP’08)*, March 2008.
- [19] R. Knopp and P. Humblet, “Information capacity and power control in single-cell multiuser communications,” in *Proc. IEEE Int. Conf. on Communications (ICC)*, vol. 1, pp. 331 – 335, June 1995.
- [20] C. Y. Wong and R. S. Cheng, “Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit, and power allocation,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 1999.
- [21] X. Wang and W. Xiang, “An OFDM-TDMA/SA MAC protocol with QoS constraints for broadband wireless LANs,” *ACM/Springer Wireless Networks*, vol. 12, no. 2, no. 2, pp. 159 – 170, 2006.
- [22] P. Viswanath, D. N. C. Tse, and R. Laroia, “Opportunistic beamforming using dumb antennas,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 48, pp. 1277 – 1294, June 2002.
- [23] H. Kim, K. Kim, Y. Han, and J. Lee, “An efficient scheduling algorithm for QoS in wireless packet data transmission,” in *Proc. IEEE Int. Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, vol. 5, pp. 2244 – 2248, Sept. 2002.

- [24] W. Anchun, X. Liang, Z. S. X. Xiiin, and Y. Yan, "Dynamic resource management in the fourth generation wireless systems," in *Proc. IEEE Int. Conference on Communication Technology (ICCT)*, vol. 2, pp. 1095 – 1098, April 2003.
- [25] P. Svedman, S. K. Wilson, and B. Ottersten, "A QoS-aware proportional fair scheduler for opportunistic OFDM," in *Proc. IEEE Int. Vehicular Technology Conference (VTC)*, vol. 1, pp. 558 – 562, Sept 2004.
- [26] H. Kim, K. Kim, Y. Han, and S. Yun, "A proportional fair scheduling for multicarrier transmission systems," in *Proc. IEEE Int. Vehicular Technology Conference (VTC)*, vol. 2, pp. 409 – 413, Sept 2004.
- [27] H. J. Zhu and R. H. Hafez, "Novel scheduling algorithms for multimedia service in OFDM broadband wireless systems," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Communications (ICC)*, vol. 2, pp. 772 – 777, June 2006.
- [28] C. Gueguen and S. Baey, "A fair MaxSNR scheduling scheme for multiuser OFDM wireless systems," in *Proc. IEEE Int. Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Sept. 2009.
- [29] C. Gueguen and S. Baey, "Compensated proportional fair scheduling in multiuser OFDM wireless networks," in *Proc. IEEE Int. Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WIMOB)*, pp. 119 – 125, Oct. 2008.
- [30] C. Gueguen and S. Baey, *Communications and Networking*, ch. Advanced Access Schemes for Future Broadband Wireless Networks. Ana Nikolic (Ed.), ISBN : 978-953-7619-X-X, SCIYO, (à paraître fin 2010).
- [31] C. Gueguen and S. Baey, "An efficient and fair scheduling scheme for multiuser OFDM wireless networks," in *Proc. IEEE Int. Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pp. 1610 – 1615, March. 2008.
- [32] C. Gueguen and S. Baey, "Weighted fair opportunistic scheduling for multimedia QoS support in multiuser OFDM wireless networks," in *Proc. IEEE Int. Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Sept. 2008.
- [33] C. Gueguen and S. Baey, "Scheduling in OFDM wireless networks without tradeoff between fairness and throughput," in *Proc. IEEE Int. Vehicular Technology Conference (VTC)*, Sept. 2008.
- [34] C. Gueguen and S. Baey, "A fair opportunistic access scheme for multiuser OFDM wireless networks," *Journal on Wireless Communications and Networking. European Association for Signal Processing (EURASIP). Special issue : Fairness in Radio Resource Management for Wireless Network*, Feb. 2009.

- [35] C. Gueguen and S. Baey, *Radio Communications*, ch. Opportunistic Access Schemes for Multiuser OFDM Wireless Networks (Chapter 14). Alessandro Bazzi (Ed.), ISBN : 978-953-307-091-9, In-Tech, April 2010.
- [36] V. de Beek et al., “A time and frequency synchronization scheme for multiuser OFDM,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 17, pp. 1900 – 1914, Nov. 1999.
- [37] IEEEStd802.16-2004, “IEEE standard for local and metropolitan area networks, part 16 : Air interface for fixed broadband wireless access systems,” *IEEE Std 802.16-2004*, Oct. 2004.
- [38] C. Hoymann, “Analysis and performance evaluation of the OFDM-based metropolitan area network IEEE 802.16,” *Computer Networks*, pp. 341 – 363, June 2005.
- [39] T. E. Truman and R. W.Brodersen, “A measurement-based characterization of the time variation of an indoor wireless channel,” in *Proc. IEEE Int. Universal Personal Communications Record (ICUPC)*, vol. 1, pp. 25 – 32, Oct. 1997.
- [40] M. Andrews, K. Kumaran, and K. Ramanan, “Providing quality of service over a shared wireless link,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 39, pp. 150–154, Feb. 2001.
- [41] J. Nagle, “On packet switches with infinite storage,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 35, no. 4, no. 4, pp. 435 – 438, April 1987.
- [42] A. Kuurne and A. Miettinen, “Weighted round robin scheduling strategies in (E)GPRS radio interface,” in *Proc. IEEE Int. Vehicular Technology Conference (VTC)*, vol. 5, pp. 3155 – 3159, Sept. 2004.
- [43] V. L. Do and K. Y. Yun, “An efficient frame-based scheduling algorithm : credit round robin,” in *Workshop on High Performance Switching and Routing, 2003, HPSR*, pp. 103 – 110, June 2003.
- [44] H. Chaskar and U. Madhow, “Fair scheduling with tunable latency : a round robin approach,” in *Proc. IEEE Int. Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, vol. 2, pp. 1328 – 1333, 1999.
- [45] L. Ji and T. A. and. S.I. Woolley, “Fair weighted round robin scheduling scheme for diffserv networks,” *Electronics Letters*, vol. 39, pp. 333 – 335, February 2003.
- [46] X. Yuan and Z. Duan, “Fair round-robin : A low complexity packet scheduler with proportional and worst-case fairness,” *IEEE Transactions on Computers*, vol. 58, pp. 365 – 379, March 2009.
- [47] S. S. Kanhere, H. Sethu, and A. B. Parekh, “Fair and efficient packet scheduling using elastic round robin,” *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 13, pp. 324 – 336, March 2002.

- [48] G. Mergen and L. Tong, “Random scheduling medium access for wireless ad hoc networks,” in *Proc. IEEE Int. Conf. on MILCOM*, vol. 2, pp. 868 – 872, October 2002.
- [49] J. R. Moorman and J. W. Lockwood, “Implementation of the multiclass priority fair queuing (MPFQ) algorithm for extending quality of service in existing backbones to wireless endpoints,” in *Proc. IEEE Int. Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, vol. 5, pp. 2752 – 2757, 1999.
- [50] A. Sen, I. Mohammed, R. Samprathi, and S. Bandyopadhyay, “Fair queuing with round robin : a new packet scheduling algorithm for routers,” in *Proc. of Seventh International Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, pp. 1001 – 1006, July 2002.
- [51] B. Dekeris, L. Narbutaite, and T. Adomkus, “A new adaptive fair queueing (AFQ) scheduler for support SLA,” in *29th International Conference on Information Technology Interfaces (ITI)*, pp. 597 – 602, June 2007.
- [52] A. Varma and D. Stiliadis, “Hardware implementation of fair queuing algorithms for asynchronous transfer mode networks,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 35, pp. 54 – 68, 1997.
- [53] B. Song, Y.-H. Lin, and R. L. Cruz, “Weighted max-min fair beamforming, power control, and scheduling for a MISO downlink,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 7, pp. 464 – 469, February 2008.
- [54] W. K. Tsai and I. Iyer, “Spatio-temporal max-min fair rate allocation,” in *Proc. IEEE Int. Conf. on Communications (ICC)*, vol. 1, pp. 480 – 484, June 2000.
- [55] P. Laixian, T. Chang, and Z. Shaoren, “Weighted max-min fair scheduling in input-queued crossbar switches,” in *Proc. IEEE Int. Conference on Communication Technology (ICCT)*, vol. 1, pp. 412 – 416, April 2003.
- [56] M. Allalouf and Y. Shavitt, “Centralized and distributed algorithms for routing and weighted max-min fair bandwidth allocation,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 16, pp. 1015 – 1024, Oct 2008.
- [57] M. Hosaagrahara and H. Sethu, “Max-min fair scheduling in input-queued switches,” *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 19, pp. 462 – 475, April 2008.
- [58] D. Pan and Y. Yang, “Max-min fair bandwidth allocation algorithms for packet switches,” in *IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS)*, March 2007.

- [59] L. Tabatabaei, V. Tassiulas, “Max-min fair self-randomized scheduler for input-buffered switches,” in *Workshop on High Performance Switching and Routing (HPSR)*, pp. 299 – 303, 2004.
- [60] A. Francini and F. M. Chiussi, “A weighted fair queueing scheduler with decoupled bandwidth and delay guarantees for the support of voice traffic,” in *Proc. IEEE Int. Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, vol. 3, pp. 1821 – 1827, November 2001.
- [61] H. Tayvar and H. Alnuweiri, “The complexity of computing virtual-time in weighted fair queuing schedulers,” in *Proc. IEEE Int. Conf. on Communications (ICC)*, vol. 4, pp. 1996 – 2002, June 2004.
- [62] L. Iannone and S. Fdida, “MRS : A simple cross-layer heuristic to improve throughput capacity in wireless mesh networks,” in *ACM Conference on emerging Networking EXperiments and Technologies (CoNEXT)*, October 2005.
- [63] L. Iannone and S. Fdida, “Evaluating a cross-layer approach for routing in wireless mesh networks,” *Telecommunication Systems*, vol. 31, no. 2-3, no. 2-3, pp. 173 – 193, Mars 2006.
- [64] L. Iannone, K. Kabassanov, and S. Fdida, “The real gain of cross-layer routing in wireless mesh networks,” in *Proc. of the 2nd Int. workshop on Multi-hop ad hoc networks : from theory to reality table of contents. International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing archive*, pp. 15 – 22, 2006.
- [65] T. Ali-Yahiya, A.-L. Beylot, and G. Pujolle, “Channel aware scheduling for multiple service flows in OFDMA based mobile wimax systems,” in *Proc. IEEE Int. Vehicular Technology Conference (VTC)*, 2008.
- [66] C. Yang, W. Wang, Y. Qian, and X. Zhang, “A weighted proportional fair scheduling to maximize best-effort service utility in multicell network,” in *Proc. IEEE Int. Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 1 – 5, September 2008.
- [67] T. E. Kolding, “QoS-aware proportional fair packet scheduling with required activity detection,” in *Proc. IEEE Int. Vehicular Technology Conference (VTC)*, pp. 1 – 5, September 2006.
- [68] V. K. N. Lau, “Proportional fair space time scheduling for wireless communications,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 53, pp. 1353 – 1360, August 2005.
- [69] K. Khawam, “The modified proportional fair scheduler,” in *Proc. IEEE Int. Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 1 – 5, September 2006.

- [70] V. K. N. Lau, "Proportional fair spatial scheduling for wireless access point with multiple antenna - reverse link with scalar feedback," in *Proc. IEEE Int. Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, vol. 1, pp. 763 – 767, November 2002.
- [71] J. Huang and Z. Niu, "A cross-layer proportional fair scheduling algorithm with packet length constraint in multiuser OFDM networks," in *Proc. IEEE Int. Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, pp. 3489 – 3493, Nov 2007.
- [72] H. Kim and Y. Han, "A proportional fair scheduling for multicarrier transmission systems," *IEEE Communications Letters*, vol. 9, pp. 210 – 212, March 2005.
- [73] R. Patachaianand and K. Sandrasegaran, "Proportional fair scheduling with reduced feedback," *Electronics Letters*, vol. 45, pp. 472 – 473, April 2009.
- [74] J. Lim, H. G. Myung, K. Oh, and D. J. Goodman, "Proportional fair scheduling of uplink single-carrier FDMA systems," in *Proc. IEEE Int. Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 1 – 6, September 2006.
- [75] D. Zheng and J. Zhang, "Channel-aware weighted proportional fair medium access control in wireless lans with MIMO links," in *Second International Conference on Quality of Service in Heterogeneous Wired/Wireless Networks*, August 2005.
- [76] C. H. Koh and Y. Y. Kim, "A proportional fair scheduling for multicast services in wireless cellular networks," in *Proc. IEEE Int. Vehicular Technology Conference (VTC)*, pp. 1 – 5, September 2006.
- [77] Y. Ma, "Proportional fair scheduling for downlink OFDMA," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Communications (ICC)*, pp. 4843 – 4848, June 2007.
- [78] T. Park, O.-S. Shin, and K. B. Lee, "Proportional fair scheduling for wireless communication with multiple transmit and receive antennas," in *Proc. IEEE Int. Vehicular Technology Conference (VTC)*, vol. 3, pp. 1573 – 1577, October 2003.
- [79] E. Liu and K. Leung, "Fair resource allocation under rayleigh and/or rician fading environments," in *Proc. IEEE Int. Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 1 – 5, September 2008.
- [80] R. Kwan, C. Leung, and J. Zhang, "Proportional fair multiuser scheduling in LTE," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 16, pp. 461 – 464, June 2009.
- [81] J.-G. Choi and S. Bahk, "Cell-throughput analysis of the proportional fair scheduler in the single-cell environment," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 56, pp. 766 – 778, March. 2007.
- [82] J. Holtzman, "Asymptotic analysis of proportional fair algorithm," in *Proc. IEEE Int. Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, vol. 2, pp. 33 – 37, Oct. 2001.

- [83] C. Rentel, W. Krzimien, B. Darian, V. Vanghi, and R. Elliott, “Comparative forward link traffic channel performance evaluation of HDR and 1XTREME systems,” in *Proc. IEEE Int. Vehicular Technology Conference (VTC)*, vol. 1, pp. 160 – 164, May. 2002.
- [84] E. Liu and K. Leung, “On proportional fair scheduling in multi-antenna wireless mesh networks—theoretical analysis,” in *Proc. IEEE Int. Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, pp. 1 – 5, December 2008.
- [85] E. Liu and K. Leung, “Proportional fair scheduling : Analytical insight under rayleigh fading environment,” in *Proc IEEE Int. Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pp. 1883 – 1888, April 2008.
- [86] C. Wengerter, J. Ohlhorst, and A. G. E. von Elbwart, “Fairness and throughput analysis for generalized proportional fair frequency scheduling in OFDMA,” in *Proc. IEEE Int. Vehicular Technology Conference (VTC)*, vol. 3, pp. 1903 – 1907, June 2005.
- [87] T. Ali-Yahiya, A.-L. Beylot, and G. Pujolle, “Cross-layer multiservice scheduling for mobile WiMAX systems,” in *Proc IEEE Int. Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pp. 1531 – 1535, Mars 2008.
- [88] Y. Fukui, N. Yamagaki, H. Tode, and K. Murakami, “Packet transfer scheduling scheme with throughput compensated considering wireless conditions,” in *Proc. IEEE Int. Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN)*, pp. 11 – 16, Oct. 2003.
- [89] H. Zhu and K. R. Liu, “Throughput maximization using adaptive modulation in wireless networks with fairness constraint,” in *Proc IEEE Int. Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, vol. 1, pp. 243 – 246, March. 2003.
- [90] M. Sanchez-Fernandez, M. Pablo-Gonzalez, and M. Lozano, “Exploiting multiuser diversity through uplink scheduling,” in *Proc. IEEE Int. Vehicular Technology Conference (VTC)*, vol. 3, pp. 1918 – 1920, June 2005.
- [91] C.-J. Chen and L.-C. Wang, “A unified capacity analysis for wireless systems with joint antenna and multiuser diversity in nakagami fading channels,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Communications*, June 2004.
- [92] Zhouhua, Yangdacheng, Qiweishi, and Mamin, “On performance of mutiuser diversity in SISO and MIMO wireless communication,” in *Proc. IEEE Int. Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, vol. 3, pp. 2872 – 2875, September 2003.

- [93] G. Song and Y. Li, "Asymptotic throughput analysis for channel-aware scheduling," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 54, no. 10, no. 10, pp. 1827 – 1834, October 2006.
- [94] T. W. Ban, W. Choi, B. C. Jung, and D. K. Sung, "Multi-user diversity in a spectrum sharing system," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 8, no. 1, no. 1, pp. 102 – 106, January 2009.
- [95] X. Zhang, W. Wang, and X. Ji, "Multiuser diversity in multiuser two-hop cooperative relay wireless networks : System model and performance analysis," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, no. 2, no. 2, pp. 102 – 106, February 2009.
- [96] B. Song, R. Cruz, and L. Milstein, "Exploiting multiuser diversity for fair scheduling in MIMO downlink networks with imperfect channel state information," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 57, no. 2, no. 2, pp. 470 – 480, February 2009.
- [97] H. Joung and C. Mun, "Capacity of multiuser diversity with cooperative relaying in wireless networks," *IEEE Communications Letters*, vol. 12, no. 10, no. 10, pp. 752 – 754, October 2008.
- [98] E. Larsson, "On the combination of spatial diversity and multiuser diversity," *IEEE Communications Letters*, vol. 8, no. 8, no. 8, pp. 517 – 519, August 2008.
- [99] A. Tajer and X. Wang, "Multiuser diversity gain in cognitive networks with distributed spectrum access," in *Proc. IEEE Int. Information Sciences and Systems (CISS)*, pp. 135 – 140, March 2009.
- [100] K. Kansanen and R. Muller, "Multiuser diversity in channels with limited scatterers," in *Proc. IEEE Int. Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 1 – 5, September 2008.
- [101] Y. Guan-ding, Z. Zhao-yang, Q. Pei-liang, and C. Peng, "Fair resource scheduling algorithm for wireless OFDM systems," in *Proc. IEEE Int. Communications, Circuits and Systems*, vol. 1, pp. 374 – 377, March 2005.
- [102] T. Turletti, *Étude et Conception de Mécanismes pour Applications Multimédias sur Réseaux IP Filaires et Sans Fil*. Thèse d'Habilitation à Diriger des Recherches (HDR), École Doctorale STIC de l'Université de Nice - Sophia Antipolis, January 2006.
- [103] T. Ali-Yahiya, A.-L. Beylot, and G. Pujolle, "Downlink resource allocation strategies for OFDMA based mobile WiMAX," *Telecommunication Systems, Springer-Verlag*, vol. 44, no. 12, no. 12, pp. 29 – 37, June 2010.
- [104] Q. Ni, L. Romdhani, and T. Turletti, "A survey of QoS enhancements for IEEE 802.11 wireless LAN," *Wireless Communication and Mobile Computing (WCMC) Journal*, vol. 4, pp. 547–566, August 2004.

- [105] A. Rachedi, S. Lohier, S. Cherrier, and I. Sahli, “Wireless network simulators relevance compared to a real testbed in outdoor and indoor environments,” in *Proc. 6th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC’2010)*, June 2010.
- [106] S. Baey, “Modeling MPEG4 video traffic based on a customization of the DBMAP,” in *Proc. Int. Symposium on Performance Evaluation of Computer and Telecommunication Systems (SPECTS)*, July 2004.
- [107] P. Brady, “A model for generating on-off speech patterns in two-way conversation,” *Bell System Technical Journal*, vol. 48, 1969.
- [108] X. Liu, E. Chong, and N. Shroff, “Opportunistic transmission scheduling with resource-sharing constraints in wireless networks,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 19, pp. 2053 – 2064, Oct. 2001.
- [109] S. S. Kulkarni and C. Rosenberg, “Opportunistic scheduling : generalizations to include multiple constraints, multiple interfaces and short term fairness,” *ACM/Springer Wireless Networks*, vol. 11, pp. 557 – 569, 2006.