HAL
open science

Allocation de ressource opportuniste dans les réseaux sans fil multicellulaires

Mahdi Ezzaouia

To cite this version:

Mahdi Ezzaouia. Allocation de ressource opportuniste dans les réseaux sans fil multicellulaires. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Atlantique; Université de Tunis El Manar, 2018. Français. NNT : 2018IMTA0098 . tel-02118466

HAL Id: tel-02118466

https://theses.hal.science/tel-02118466v1

Submitted on 3 May 2019

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

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

THESE DE DOCTORAT DE

L'ÉCOLE NATIONALE SUPERIEURE MINES-TELECOM ATLANTIQUE
BRETAGNE PAYS DE LA LOIRE - IMT ATLANTIQUE
COMUE UNIVERSITE BRETAGNE LOIRE
EN COTUTELLE AVEC L'UNIVERSITE DE TUNIS EL MANAR

ECOLE DOCTORALE N° 601
Mathématiques et Sciences et Technologies
de l'Information et de la Communication
Spécialité : *Informatique*

Par
Mahdi EZZAOUIA

Allocation de ressource opportuniste dans les réseaux sans fil multicellulaires

Thèse présentée et soutenue à Rennes, le 8 novembre 2018
Unité de recherche : Institut de Recherche en Informatique et Systèmes Aléatoires (IRISA
Thèse N° : 2018IMTA0098

Rapporteurs avant soutenance :

Sami TABBANE	Professeur, Sup 'Com-Tunisie
Lila BOUKHATEM	Maître de Conférences, HDR, Université Paris-Sud

Composition du Jury :

Président :	Marcelo DIAS DE AMORIM	Directeur de recherche, CNRS, UPMC
Examinateurs :	Sami TABBANE	Professeur, Sup 'Com-Tunisie
	Lila BOUKHATEM	Maître de Conférences, HDR, Université Paris-Sud
	Abdelaziz SAMET	Professeur, INSAT-Tunisie
Dir. de thèse :	Xavier LAGRANGE	Professeur, IMT Atlantique
	Ammar BOUALLEGUE	Professeur émérite, ENIT-Tunisie
Co-dir. de thèse :	Cédric GUEGUEN	Université de Rennes 1

À mes chers parents Mona & Hatem
pour avoir fait de moi ce que je suis aujourd'hui.

REMERCIEMENTS

Je remercie tout d'abord les professeurs Sami Tabbane et Lila Boukhatem d'avoir accepté de rapporter ma thèse, et je remercie très sincèrement Marcelo Dias De Amorim, directeur de recherche au CNRS, d'avoir accepté de présider mon jury de thèse. Je remercie également le professeur Abdelaziz Samet pour avoir accepté de faire partie du jury. Ce fut un honneur et un plaisir de les avoir dans mon jury de thèse.

Je tiens à remercier très chaleureusement mes deux directeurs de thèse les Professeurs Xavier Lagrange et Ammar Bouallègue pour avoir dirigé ma thèse durant ces années. Merci de m'avoir encouragé et de m'avoir fait confiance.

Je tiens à remercier surtout Cédric avec qui il est très agréable de travailler. Merci aussi à lui pour sa disponibilité, son soutien et sa confiance. J'ai apprécié fortement ses qualités d'analyses, ses critiques et les débats d'idées que nous avons eus tout au long de ce travail.

Bien évidemment, je tiens à remercier mon professeur Mahmoud Ammar qui m'a offert l'opportunité de réaliser cette thèse dans les meilleures conditions possibles.

Je tiens à remercier très amicalement tous mes collègues de travail pour la belle ambiance que nous avons eue durant tout le long de ma thèse. Je leur souhaite à tous une bonne continuation.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à tous les membres de ma famille, qui ont toujours cru en moi et qui ont toujours été présents pour me soutenir. Merci à mes amis, qui m'ont toujours apporté leur soutien, conseils et encouragements.

RÉSUMÉ

La forte croissance du trafic dans les réseaux mobiles s'accompagne d'une augmentation de son hétérogénéité, tant dans l'espace qu'au cours du temps. Cette thèse porte sur des algorithmes d'ordonnancement adaptés à des trafics avec des zones à forte concentration et variables dans le temps.
Nous proposons un mécanisme de prêt de la ressource spectrale d'une cellule en sous- charge à une voisine en surcharge combinée à un ordonnancement réactif au sein de chaque cellule.

Nous nous intéressons aussi à l'architecture Cloud Radio Access Network qui sépare les têtes de transmission radio (Remote Radio Heads, RRHs) des unités de traitement en bande de base (Baseband Units, BBUs). L'interconnexion entre les BBUs et les RRHs se fait selon deux modes. Le premier est appelé association bi-univoque et consiste à allouer les unités de ressources de la trame radio d'une BBU à une seule RRH.

Dans le second mode, appelé association multiple, une BBU peut gérer plusieurs RRHs. Nous proposons un mode d'association hybride dans lequel les unités de ressource de chaque trame sont réparties en deux tranches. La première constitue une tranche non partagée qui est allouée aux utilisateurs centraux selon l'association bi-univoque afin d'augmenter le débit notamment à haute charge de trafic. La deuxième tranche est constituée par une quantité d'unités de ressources partagées par un groupe de RRHs appartenant au même BBU. Cette tranche commune est configurée en association multiple et est allouée aux utilisateurs frontaliers et mobiles. Nous montrons que le mode hybride réduit les interférences intercellulaires, diminue le nombre de handover inter-BBU et améliore la consommation énergétique.
Mots clés : Qualité de service, Ordonnancement, Allocation de ressources, OFDMA, Gestion des interférences, C-RAN.

ABSTRACT

The exponential growth of traffic in mobile networks is accompanied by an increase in its heterogeneity, both in space and over time. This thesis deals with scheduling algorithms adapted to highly concentrated and time-varying traffic zones.

We propose a spectrum borrowing mechanism from an under-loaded cell to an overloaded one combined with a reactive intra-cellular scheduling algorithm.

We are also interested in the Cloud Radio Access Network architecture that separates the Radio Head (RRH) from the Baseband Unit (BBU). The BBU is connected to the RRU according to two modes. The first one is called a one-to-one association and consists in allocating the resource units of the BBU radio frame to a single RRH.

In the second mode which is called multiple association, a BBU can handle multiple RRHs. We propose a hybrid association mode in which the resource units of each frame are divided into two slices. The first one constitutes an unshared slice and is allocated to central users according to the one-to-one association in order to increase the throughput, especially at high traffic load. The second slice contains a quantity of resource units that are shared by a group of RRHs belonging to the same BBU. This common slice is configured according to the multiple association mode and is allocated to the edge and mobile users. We show that the hybrid mode reduces the inter-cell interferences, decreases the number of inter-BBU handovers and improves the energy consumption.
Keywords Quality of Service, Scheduling, Resource allocation, OFDMA, Interference management, C-RAN

TABLE DES MATIÈRES

Acronymes et Abréviations **xv**

Table des figures **xvii**

Liste des tableaux **xix**

Introduction générale **1**

1 Bases sur les communications sans fil **7**
1.1 Introduction 8
1.2 Spécificités des communications sans fil 8
1.3 Le concept cellulaire 9
1.3.1 La réutilisation unitaire des fréquences 11
1.3.2 La notion d'interférence 11
1.3.3 Motif de réutilisation des fréquences 12
1.4 Allocation de ressource intracellulaire 14
1.4.1 OFDM 14
1.4.2 Les ressources physiques en LTE 14
1.4.3 L'adaptation de lien 15
1.4.4 Principes généraux des ordonnanceurs intracellulaires 17
1.4.5 Les stratégies de l'ordonnancement 20
1.5 Conclusion 21

2 Ordonnancement multicellulaire **23**
2.1 Introduction 24
2.2 État de l'art 24
2.3 Inter-Cellular Bandwidth Fair Sharing scheduler (IBFS) 27
2.3.1 Problématique et approche adoptée 27
2.3.2 L'algorithme Inter-Cellular Bandwidth Fair Sharing scheduler (IBFS) . 29
2.3.3 Évaluation de performances 33
2.4 Le Dynamic Inter-cellular Bandwidth Fair Sharing Scheduler (DIBFS) 47
2.4.1 Limites de l'IBFS 47
2.4.2 Description du DIBFS 48

2.4.3 Évaluation de performances 52
2.5 Conclusion 59

3 Allocation de ressource et gestion des interférences intercellulaires 63
3.1 Introduction 64
3.2 La réduction et le contrôle des interférences intercellulaires (Inter-Cell Interference Mitigation) 64
3.3 Classification des techniques ICIC 66
3.3.1 Classification basée sur le degré de centralisation 66
3.3.2 Classification basée sur le niveau de la coordination 67
3.4 ICIC dans les réseaux LTE 68
3.4.1 La réutilisation fractionnaire de fréquences FFR (Fractional Frequency Reuse 68
3.4.2 La réutilisation souple de ressources SFR (Soft Frequency Reuse) . . . 69
3.5 Études et évaluation de performances des schémas ICIC 70
3.5.1 Modélisation du système 70
3.5.2 Étude comparative des schémas d'allocation du spectre 72
3.6 Contibution : proposition de techniques ICIC autonomes et dynamiques 77
3.6.1 État de l'art et problématique 78
3.6.2 Algorithme de transfert entre les bandes (Bandwidth Handoff Algorithm BHA) 80
3.6.3 Évaluation de performances 83
3.7 Conclusion 89

4 Allocation des ressources dans le cadre du C-RAN 91
4.1 Introduction 92
4.2 Le C-RAN : évolution de l'architecture de la station de base 92
4.2.1 L'architecture traditionnelle 92
4.2.2 Station de base avec des têtes de transmission radio (RRHs) 92
4.2.3 Architecture des stations de base basées sur le C-RAN 94
4.3 Les avantages du C-RAN 95
4.3.1 Adaptation au trafic non-uniforme 97
4.3.2 Économies en termes d'énergie et de coûts 98
4.3.3 Amélioration de la capacité, de l'efficacité spectrale et diminution des délais 98
4.3.4 Facilité de mise à niveau et de maintenance du réseau 98
4.4 Contribution : adaptation dynamique des stratégies d'association entre RRHs et BBUs 99
4.4.1 Contexte 99
4.4.2 La solution proposée 101
4.4.3 Évaluation de performances 106
4.5 Conclusion 111

5 Conclusion générale **113**
5.1 Synthèse des contributions 114
5.2 Perspectives 115

Bibliographie **117**

Liste des publications **127**

ACRONYMES ET ABRÉVIATIONS

BER	Bit Error Rate
BS	Base Station
BHA	Bandwidth Handoff Algorithm
BBU	Baseband Unit (unité de bande de base)
CEU	Cell Edge User
CCU	Cell Center User
CoMP	Coordinated Multipoint
C-RAN	Cloud Radio Access Network
CQI	Channel Quality Indicator
CDMA	Code Division Multiple Access
CPRI	Common Public Radio Interface
DCA	Dynamic Channel Allocation
D-FFR	Dynamic Fractional Frequency Reuse
DIBFS	Dynamic Inter-Cellular Bandwidth Fair Sharing scheduler
FRF	Frequency Reuse Factor
FCA	Fixed Channel Allocation
FFR	Fractional Frequency Reuse
GSM	Global System for Mobile Communications
HCA	Hybrid Channel Allocation
IBFS	Inter-Cellular Bandwidth Fair Sharing scheduler
IQ	In-phase and quadrature
ICIC	Inter-Cell Interference Coordination
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	LTE advanced

METIS	Enablers for the Twenty-twenty Information Society
MCS	Modulation and Coding Scheme.
MU	Mobile User
MAC	Media Access Control
MaxSNR	Maximum Signal-to-Noise Ratio
MCPDOR	Mean Cell Packet Delay Outage Ratio
MQAM	M Quadrature Amplitude Modulation
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
PF	Proportional Fair
PDOR	Packet Delay Outage Ratio
QoS	Quality of Service
QoE	Quality of Experience
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
RRH	Remote Radio Head
RAN	Radio Access Network
RU	Resource Unit
RC	Radio Cognitive
RB	Resource Block
SINR	Signal to Interference and Noise Ratio
SB	Simple Borrowing
SFR	Soft Frequency Reuse
SDN	Software-Defined Networking
TTI	Transmission Time Intervalle
TDMA	Time Division Multiple Access
UE	User Equipment
UR	Unité de Ressource
3GPP	3rd Generation Partnership Project
4G	Quatrième Génération
5G	Cinquième Génération

TABLE DES FIGURES

1.1 Réseau cellulaire avec des antennes omnidirectionnelles au centre des cellules. 10
1.2 L'approche Reuse 1. 11
1.3 L'interférence intercellulaire. 13
1.4 L'approche Reuse 3. 13
1.5 Canaux sélectifs en fréquence. 15
1.6 Grille de ressources temps fréquence pour le système LTE. 16
1.7 Fonctionnement de l'ordonnanceur pour les réseaux radios mobiles [1]. 19

2.1 Exemple de fonction de répartition des temps de retard des paquets d'un flux et illustration du PDOR [2, 3]. 31
2.2 Diagramme d'états-transitions de l'IBFS. 34
2.3 Modélisation du réseau cellulaire simulé. 35
2.4 Résultats de simulation du premier scénario 38
2.5 Scénario d'évaluation de performance. 40
2.6 Charge de trafic des cellules du système. 41
2.7 Comparaison en termes de bande passante utiliée de REUSE3 et IBFS. 42
2.8 Délai moyen du système selon REUSE3. 43
2.9 Délai moyen du système selonh $IBFS_{load}$. 44
2.10 Délai moyen du système selon $IBFS_{MCPDOR}$. 45
2.11 Analyse du respect des contraintes QoS. 46
2.12 Comparaison de l'insatisfaction des utilisateurs pour $REUSE$ 3, $IBFS_{load}$ et $IBFS_{MCPDOR}$. 46
2.13 Modélisation du système. 50
2.14 Répartition de la bande entre les cellules. 51
2.15 Résultats de simulation du 1er scénario - PDOR_{target} = 5 %. 53
2.16 Étude de W_{min} des cellules voisines en considérant la charge de trafic et le temps. 54

2.17 Délai moyen des utilisateurs de tout le système et occupation moyenne des files d'attente. 54
2.18 Résultats de l'insatisfaction du scénario à faible charge de trafic - $PDOR_{target}$ = 5 %. 57
2.19 MCPDOR observé et délai moyen dans le scénario à faible charge de trafic. . . 57
2.20 Résultats de l'insatisfaction du scénario à faible charge de trafic - $PDOR_{target}$ = 5 %. 58
2.21 MCPDOR observé et délai moyen dans le scénario à faible charge de trafic. . . 59

3.1 Classification des techniques ICIC basée sur le niveau de centralisation. 67
3.2 Classification des techniques ICIC basée sur le niveau de coordination. 68
3.3 La technique Fractional Frequency Reuse (FFR). 69
3.4 La technique Soft Frequency Reuse (SFR). 70
3.5 Temps d'attente moyen des paquets. 74
3.6 Insatisfaction moyenne des utilisateurs. 75
3.7 Indice d'équité. 76
3.8 Temps d'attente moyen des paquets dans les buffers. 85
3.9 Ratio d'utilisation de la bande. 87
3.10 Indice d'équité. 87
3.11 Insatisfaction moyenne des utilisateurs dans la cellule centrale $PDOR_{target} = 5\%$. 88
3.12 Nombre moyen d'utilisateurs assignés à la sous-bande intérieure. 88

4.1 Gain de multiplexage statistique de l'architecture C-RAN pour les réseaux mobiles [4]. 93
4.2 Évolution de l'architecture des stations de base [4]. 94
4.3 Architecture C-RAN du réseau mobile LTE [4] 95
4.4 Variation de la charge de trafic durant une journée dans une zone industrielle [5] 97
4.5 Les schémas d'association entre les BBUs et les RRHs. 99
4.6 Structure de la trame du mode one-to-one. 102
4.7 Structure de la trame du mode one-to-many : ordonnancement conjoint de RUs et de RRHs. 103
4.8 Structure de la trame hybride. 104
4.9 Variation temporelle de la solution proposée entre les différentes stratégies de transmission. 107
4.10 Résultats de l'évaluation de performances. 110

LISTE DES TABLEAUX

1.1 Nombre de sous-porteuse et de RB en fonction de la largeur de bande [6]. . . . 15
1.2 Schéma de Modulation et de Codage [7]. 17

2.1 Liste des symboles. 35
2.2 Paramètres de la simulation. 37
2.3 Liste des symboles. 48

3.1 Indice CQI et efficacié pour le LTE [8]. 73
3.2 Paramètres de la simulation. 84

4.1 Comparaison entre l'architecture traditionnelle des stations de base, les stations de base avec les RRHs et l'architecture C-RAN [4]. 96
4.2 Paramètres de la simulation. 109

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Contexte

La prolifération rapide des applications multimédias ainsi que l'augmentation vertigineuse du nombre d'abonnés aux services de communication radio-mobile ont abouti à une hausse de la demande en termes de débit. En effet, le trafic de données mobiles a augmenté de 74 % en 2015 [9] et de 63 % en 2016 [10], atteignant 30.6 exaoctets par mois en 2020 [9]. Cette augmentation rapide des demandes a conduit le 3GPP à concevoir les réseaux LTE/LTE-A afin de pouvoir satisfaire la QoS fournie aux utilisateurs. Cependant, accroître la capacité tout en améliorant la Qualité de Service (QoS) reste toujours un défi que les systèmes de communication sans-fil actuelles tentent de relever. De plus, dans une perspective à long-termes, l'amélioration incrémentale de la QoS en se basant sur le réseau cellulaire 4G n'est pas suffisante. Maintenant, nous faisons face à une évolution rapide des réseaux cellulaires à travers l'ère de la 5ème génération. Ainsi, le projet *Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society* (METIS) [11] a défini un ensemble d'objectifs techniques pour étendre les systèmes actuels de communication sans fil tout en définissant de nouveaux scénarios. Ces objectifs, par rapport à la 4G, peuvent être résumés par ce qui suit [12] :

- une capacité en Mbit/s/km^2 multiplié par 1000,
- un débit de données par utilisateurs de 10 à 100 fois plus grand,
- 10 à 100 fois plus de terminaux mobiles connectés,
- une durée de vie des équipements 10 fois plus élevée,
- réduction du délai de bout-en-bout de 5 fois.

Le premier système commercial de la 5G est planifié pour l'année 2020 dans le but d'améliorer le système 4G actuel [13]. Ce nouveau système doit répondre à ces besoins en améliorant

l'efficacité spectrale, l'efficacité énergétique et la QoS globale des réseaux. Dans ce contexte, les mécanismes de gestion des ressources radios ont été largement étudiés au sein des milieux industriels et académiques. Ces mécanismes ont pour but d'utiliser aussi efficacement que possible le spectre fréquentiel rare et limité ainsi que l'infrastructure disponible du réseau cellulaire. Cependant, l'efficacité actuelle de ces mécanismes reste toujours à perfectionner et de nouvelles techniques d'allocation de ressources radios sont requises afin de satisfaire les contraintes prédéfinies des futurs systèmes de communication sans fil.

De plus, pouvoir garantir une bonne QoS au sein des réseaux cellulaires est une tâche difficile pour les opérateurs. En effet, contrairement aux réseaux filaires, les transmissions sans fil dépendent fortement des variations du canal de propagation. À cause de plusieurs phénomènes générés par ce dernier (le pathloss, le shadowing le multipath fading), la qualité du signal radio est fortement détériorée ce qui réduit la capacité de la transmission [14, 15, 16, 17]. En outre, la QoS observée par les applications est détériorée non seulement en termes d'intégrité de données mais aussi par l'apparition de forts pics de délais et de pertes de paquets. Plusieurs recherches ont été menées dans le but d'améliorer les performances des transmissions sans fil. Parmi toutes les techniques qui ont été proposées afin de faire face aux effets du canal de propagation, la technique Orthogonal Frequency Multiple Access (OFDM) [18] a émergé et a été largement utilisée aux seins des réseaux sans fil de nouvelles générations telles que la Long Term Evolution (LTE) [19] et la Long Term Evolution Advanced (LTE-A). La technique OFDM a pour but de combattre les effets négatifs de la transmission multi-trajets : la bande passante est divisée en sous-bandes ayant une largeur spectrale inférieure à la largeur de la bande de cohérence du canal. Ensuite, les symboles du signal à transmettre sont émis en parallèle sur les sous-porteuses de ces sous-bandes. D'autre part, cette division de la bande passante a pour avantage l'introduction de la diversité fréquentielle. La diversité fréquentielle combinée avec la diversité temporelle et la diversité multi-utilisateur permet à l'ordonnanceur de disposer d'une marge de manœuvre supplémentaire afin d'améliorer les performances globales du système. Dans ce contexte, un grand intérêt a été donné pour la conception d'algorithmes d'ordonnancement intracellulaire. Ces ordonnanceurs ont pour but d'optimiser le partage des ressources fréquentielles entre les mobiles d'une cellule donnée afin d'améliorer les performances des systèmes OFDM dans un contexte multi-utilisateur [20, 21, 22, 23].

Cependant, dans le contexte actuel intercellulaire sans fil, chaque cellule se voit bien souvent attribuer des fréquences de manière statique. Bien que facile à mettre en œuvre, cette façon de procéder est aujourd'hui obsolète car particulièrement sous-optimale. En effet, une caractéristique principale des réseaux radio-mobiles est que les utilisateurs se déplacent fréquemment d'une cellule à une autre. Ainsi, la charge de trafic varie fortement au cours d'une journée. Par exemple, elle atteint ses pics durant le jour pour les zones industrielles et le soir pour les zones

résidentielles. Ces variations dépendent aussi de la zone géographique dans laquelle se situent la cellule (i.e, urbaine, rurale). Par conséquent, cette distribution non uniforme de la charge dans l'espace et dans le temps entraîne au niveau des cellules des besoins différents en termes de ressources fréquentielles. Un ordonnanceur de niveau supérieur ayant pour rôle d'allouer \réallouer dynamiquement les ressources radios entre les cellules doit donc être envisagé.

D'autre part, l'augmentation de la capacité et la maximisation du débit offert peut se faire avec un déploiement dense de stations de base et une réutilisation agressive du spectre. Dans ce sens, pour atteindre les objectifs de la 5G, l'interférence intercellulaire causée par l'utilisation du même spectre entre cellules voisines doit être réduite. En effet, ces dernières ont un impact négatif sur la QoS fournie particulièrement pour les mobiles frontaliers. Ainsi, les techniques de coordination intercellulaire des interférences (Intercell Interference Coordination techniques (ICIC)) ont été conçues afin de réduire ces effets négatifs en se basant sur la coordination de la bande et de la puissance de transmission. En fait, cette coordination se fait à l'échelle du réseau en ajustant l'allocation des ressources fréquentielles et les puissances de transmission entre les différentes cellules. Les techniques ICIC consistent à partager la bande en deux sous-bandes. De même, les utilisateurs sont classifiés en deux groupes. Le premier est formé par les utilisateurs centraux et le second contient les mobiles frontaliers. Généralement, pour les techniques ICIC statiques, cette classification se base sur un seuil fixe qui peut être soit un SINR moyen soit sur la distance entre l'utilisateur et sa stations de base. Dans ce contexte, chaque sous-bande est associée à chaque groupe d'utilisateur. Bien que les solutions ICIC permettent de protéger les utilisateurs frontaliers contre les interférences, elles ne sont efficaces que lorsque les mobiles sont uniformément distribués entre les zones et donc, entre les sous-bandes ICIC. En fait, dans le cas d'une distribution non-homogène d'utilisateur au sein de la cellule, certaines zones seront en surcharge et donc, la coordination de l'interférence sera insuffisante à elle seule pour garantir une bonne QoS.

Un déploiement dense de stations de bases entraîne une augmentation considérable aux niveaux des coûts d'exploitation et d'investissement tandis que les revenus des opérateurs restent stables [24]. Dans ce contexte, le réseau d'accès radio type cloud (C-RAN) a été présenté comme une technologie prometteuse qui améliore les performances du réseau et réduit les dépenses. En outre, l'architecture C-RAN joue un rôle primordial dans la gestion des ressources radios et des ressources de calcul du système. Le concept clé du C-RAN est de décomposer la station de base conventionnelle en une entité de traitement en bande de base, connue sous le nom de BaseBand Unit (BBU), et en une tête de transmission radio à faible coût, appelée Remote Radio Head (RRH). Alors que les RRHs sont réparties sur plusieurs sites, les BBU sont regroupées dans un centre de données appelé BBU pool. De plus, les RRHs sont connectées aux BBU via des liaisons optiques à hautes performances. Dans cette architecture centralisée,

la BBU peut gérer une seule RRH et on parle alors d'association one-to-one (association bi-univoque). De même, cette BBU peut gérer plusieurs têtes de transmission radio permettant des gains de multiplexage statistique (association one-to-many ou multiple).

Contributions

Dans ce rapport, nous proposons de nouveaux schémas d'allocation de ressources dans les réseaux cellulaires basés sur un accès OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access). Les principales contributions réalisées dans le cadre de cette thèse sont résumées par ce qui suit :

- Nous proposons une solution d'allocation dynamique des ressources radios entre les différentes cellules pour améliorer la QoS des réseaux radios mobiles futurs. Elle combine deux ordonnanceurs fonctionnant sur deux échelles de temps différentes. Le premier est l'ordonnanceur traditionnel qui travaille à l'échelle de quelques millisecondes pour allouer les ressources radios aux utilisateurs. Pour ce faire, il se base sur l'allocation de ressources globale fournie par notre second ordonnanceur. Ce dernier est appelé ordonnanceur multicellulaire et fonctionne sur une échelle de temps plus large. En fait, il assure l'allocation dynamique des ressources radios entre les cellules en leur assignant/réassignant la bande passante en fonction du contexte.

- Nous proposons le concept de bande passante minimale durant le processus d'ordonnancement multicellulaire. Ce dernier paramètre correspond à la quantité minimale de ressource radio qu'une cellule en sous-charge doit garder en sa possession afin de se protéger contre les hauts pics de débit soudains et irréguliers. Dans ce contexte, nous introduisons un nouvel ordonnanceur intercellulaire qui calcule dynamiquement la bande passante minimale de chaque cellule suivant le ratio de bande qu'elle consomme ainsi que de la quantité de ressource radio dont elle dispose. La solution permet d'améliorer la QoS des cellules en surcharge ainsi que de tout le système.

- Nous présentons une analyse quantitative de plusieurs modèles de gestion des interférences intercellulaires. Nous introduisons une technique dynamique qui bascule les utilisateurs des sous-bandes ICIC en surcharge vers les sous-bandes en sous-charge afin d'adapter le réseau cellulaire à la distribution non uniforme des utilisateurs. La solution classifie dynamiquement les mobiles actifs en utilisateurs frontaliers et centraux en se basant sur une heuristique d'équilibrage de charge. En fait, chaque cellule gère d'une manière autonome l'allocation de ses ressources radios sans avoir recours à une modification de la bande passante allouée aux autres cellules du réseau. Par conséquent, la solution

proposée est bien adaptée à la répartition non uniforme des utilisateurs à l'échelle multicellulaire et ne crée pas des messages de signalisation supplémentaires. De cette manière, on améliore le taux d'utilisation de la bande, on réduit le délai de transmission des paquets et on augmente le taux d'utilisateurs satisfaits par rapport aux techniques classiques de l'état de l'art.

- Nous proposons un mode d'association hybride entre les BBUs et les RRHs dans lequel les unités de ressources de chaque trame sont réparties en deux tranches. La première constitue une tranche non partagée et est allouée aux utilisateurs centraux selon l'association logique one-to-one afin d'augmenter le débit fourni notamment à haute charge de trafic. La deuxième tranche est constituée par une quantité d'unités de ressources partagée par un cluster de RRHs appartenant au même BBU. Cette tranche commune est transmise selon l'association one-to-many et est destinée à être allouée aux utilisateurs frontaliers et mobiles des RRHs dans le but de réduire les interférences intercellulaires ainsi que pour assurer une gestion efficace des handovers. Cette solution est combinée avec un algorithme qui ajuste dynamiquement l'association entre BBUs et RRHs (i.e., one-to-one, one-to-many ou hybride) en se basant sur l'utilisation des ressources radios des BBUs. En d'autres termes, notre proposition s'adapte à la charge de trafic du réseau en profitant des avantages de l'association one-to-many à faible charge de trafic et de ceux de la one-to-one à haute charge.

Organisation du manuscrit de thèse

Cette thèse est constituée par 5 chapitres :

Le chapitre 1 traite les spécificités des communications sans fil. En outre, nous parlons des caractéristiques du canal radio, particulièrement de ses propriétés qui affectent directement les réseaux cellulaires. Ensuite, les principes de bases sur la planification radio cellulaire sont détaillés incluant la notion d'interférence intercellulaire. Puis, nous présentons la technique de modulation OFDM ainsi que les bases des politiques de gestion des ressources radio.

Le chapitre 2 évoque la problématique de l'ordonnancement multicellulaire. Nous introduisons le Mean Cell Packet Delay Outage Ratio (MCPDOR) comme métrique permettant de mesurer la QoS dans les réseaux mobiles. Nous introduisons aussi deux ordonnanceurs intercellulaires ayant le même principe de fonctionnement mais reposant sur de différentes métriques de sélection de cellules en difficulté : la charge de trafic et l'MCPDOR. Nous proposons le concept de la bande passante minimale et nous introduisons un dernier ordonnanceur multicellulaire basé sur le calcul dynamique de ce dernier paramètre.

Le chapitre 3 aborde le sujet de la gestion des interférences intercellulaires. Nous présentons deux types de classification des techniques ICIC : la première est basée sur le niveau de coopération et l'autre sur le degré de centralisation. Nous effectuons une étude quantitative de certains schémas d'allocation du spectre. Enfin, nous présentons une solution dynamique et autonome permettant d'adapter les techniques ICIC à la distribution non uniforme du trafic.

Le chapitre 4 présente l'architecture générale du C-RAN ainsi que les motivations qui ont poussé les milieux industriels et scientifiques à s'intéresser à cette solution. Nous présentons notre technique hybride d'association entre les BBUs et les RRHs. Ensuite, nous introduisons notre algorithme dynamique permettant de sélectionner le mode d'association le plus adéquat du réseau C-RAN afin de s'adapter à la charge de trafic.

Le chapitre 5 conclut cette thèse et donne un aperçu sur de futurs travaux.

CHAPITRE 1

BASES SUR LES COMMUNICATIONS SANS FIL

Sommaire

1.1 Introduction **8**

1.2 Spécificités des communications sans fil **8**

1.3 Le concept cellulaire **9**

1.3.1 La réutilisation unitaire des fréquences 11

1.3.2 La notion d'interférence 11

1.3.3 Motif de réutilisation des fréquences 12

1.4 Allocation de ressource intracellulaire **14**

1.4.1 OFDM 14

1.4.2 Les ressources physiques en LTE 14

1.4.3 L'adaptation de lien 15

1.4.4 Principes généraux des ordonnanceurs intracellulaires 17

1.4.5 Les stratégies de l'ordonnancement 20

1.5 Conclusion **21**

1.1 Introduction

Les avancées rapides dans le domaine des réseaux radio mobiles ont poussé les opérateurs à proposer de nouveaux services ce qui a fait exploser la demande des utilisateurs en termes d'applications multimédias à haut débit. Afin de supporter cette demande de charge de trafic, d'efficaces politiques de gestion des ressources doivent être maintenant considérées afin d'exploiter au maximum le spectre fréquentiel à la fois rare et limité. En effet, la conception de techniques d'allocation de ressources optimales qui assurent une gestion efficace des interférences intercellulaires est essentielle afin de fournir une bonne QoS.

Ce chapitre traite en particulier des spécificités des transmissions sans fil. Nous présentons un état de l'art global sur les mécanismes de gestion de ressources radio dans le système LTE. Nous parlons aussi du concept de l'ordonnancement multi-utilisateur dans le cadre des réseaux OFDM sans fil.

1.2 Spécificités des communications sans fil

En télécommunication radio-mobile, les signaux transportant l'information se propagent soit à partir de l'antenne d'émission vers le mobile (liaison descendante ou downlink) soit à partir du mobile vers la station de base (BS) (liaison montante ou uplink) dans l'air libre subissant les phénomènes d'absorption, réflexion, diffraction, réfraction, diffraction et diffusion. Ces derniers sont causés par la nature du terrain dans lequel ils se propagent, par l'atmosphère et aussi par les objets que le signal rencontre dans ses chemins tels que les immeubles, les arbres, les collines, etc. Ces phénomènes physiques déterminent les principales caractéristiques du canal de transmission responsable de la nature du signal capté par le récepteur et donc en grande partie la QoS offerte. En effet, contrairement aux réseaux filaires, la qualité et le débit de transmission dépendent fortement des variations du signal reçu au niveau du récepteur. En outre, ces phénomènes sont généralement modélisés par :

- Les pertes de propagation (pathloss) : ils caractérisent l'atténuation du signal à cause du trajet séparant l'émetteur du récepteur et de l'environnement de propagation. Cette atténuation est généralement proportionnelle au facteur C/d^{α}. Le paramètre d représente la distance séparant l'émetteur du récepteur, α et C prennent des valeurs qui varient en fonction de l'environnement de propagation. Dans la plupart du temps, α est compris entre 2 et 4 mais ce paramètre peut parfois excéder la valeur 4 notamment en présence d'obstacles.

- L'effet du masque (ou shadowing) : c'est une perte au niveau de la puissance du signal transmis causée par un objet de grande taille (ex immeuble) quand il s'interpose entre l'émetteur et le récepteur. L'effet du shadowing varie en fonction du déplacement du récepteur mais cette variation est généralement lente en la comparant à l'intervalle de temps de transmission d'un symbole (1 ms pour le LTE).

- Le multipath fading : ces fluctuations de l'onde électromagnétique sont dues à la décomposition naturelle du signal émis en plusieurs sous-signaux empruntant chacun une trajectoire différente en fonction des réflexions, diffusions et réfractions jusqu'au récepteur. Le signal reçu est généralement constitué par une recombinaison de plusieurs trajets (multi-trajets) qui, selon la fréquence utilisée, sont plus ou moins déphasés. Par conséquent, cette recombinaison peut être soit constructive, soit destructive. Dans le premier cas, ces variations peuvent augmenter la puissance reçue de quelques décibels [25]. Dans le cas d'une recombinaison destructive, les multi-trajets peuvent entraîner des pertes au niveau de la puissance reçue de plusieurs dB en milieu urbain [26].

1.3 Le concept cellulaire

Afin de couvrir une large zone, les planificateurs des réseaux radios mobiles divisent le territoire en des zones géographiques appelées *cellule*. Toutes communications avec chaque cellule se fait à travers une station de base (Base Station BS) située au centre et ce en utilisant des groupes de canaux fréquentiels, notés par Fi (i =1, 2, ..., n) dans la figure 1.1. Les mêmes bandes de fréquences sont répétés (réutilisés) dans toutes les cellules avec une certaine distance afin de préserver le réseau cellulaire des interférences intercellulaires. Ainsi, l'idée derrière le découpage cellulaire est qu'à travers la réutilisation de la bande passante dans des cellules distantes, on peut assurer une couverture dans des zones de toutes tailles.

Cependant, la détermination de la taille et de la forme d'une cellule ainsi que l'allocation du spectre sont des critères très importants dans la planification des réseaux radios mobiles puisqu'ils influent directement sur les performances du système. En outre, la taille et la forme de chaque cellule dépend de la qualité du signal reçus à l'intérieur de la zone de couverture de la BS qui elle-même dépend de plusieurs facteurs tels que la nature du terrain environnant, les bâtiments, la hauteur et la puissance des antennes d'émission, la demande des utilisateurs en termes de débit et leur concentration, ainsi que les conditions atmosphériques, etc. Généralement, les cellules sont représentées par des hexagones réguliers, mais en raison des conditions topographiques et environnementales, ceci est seulement une représentation théorique. Dans le cas réel, les cellules ont des formes très irrégulières et se chevauchent ce qui va permettre aux

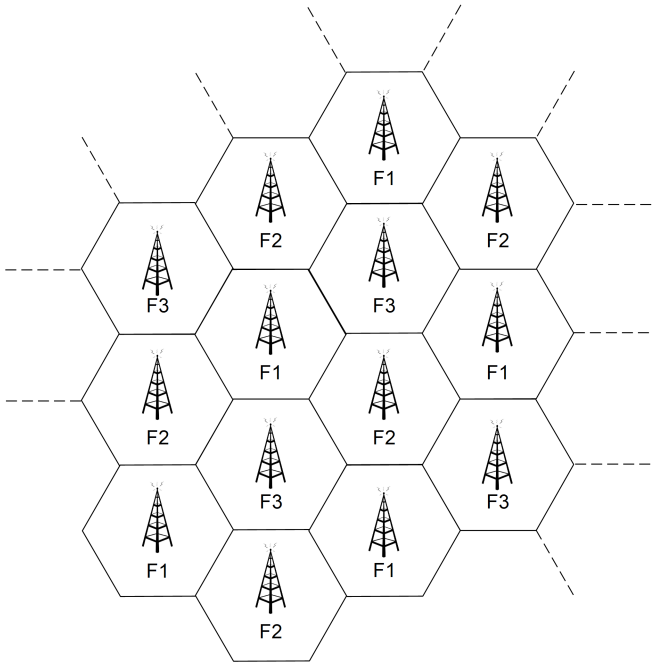


FIGURE 1.1 – Réseau cellulaire avec des antennes omnidirectionnelles au centre des cellules.

utilisateurs se trouvant aux extrémités de choisir la BS avec laquelle ils pourraient se connecter [27] mais également, cela va accroître les problèmes potentiels d'interférences.

Comme nous venons de le mentionner, la réutilisation du spectre est une caractéristique clé des réseaux cellulaires. Toute la bande disponible est divisée en plusieurs sous-bandes étroites. Chaque sous-bande est assignée à une station de base d'un motif donné lui même constitué de plusieurs cellules adjacentes. Le nombre de sous-bande devrait être égale à la taille de chaque motif cellulaire appelée facteur de réutilisation de fréquences (Frequency Reuse Factor FRF). Dans ce cas, les différentes cellules voisines dans le réseau émettent sur de différentes sous-bandes dans le but de réduire les interférences intercellulaires. Ainsi, une nouvelle problématique vient de s'ajouter et qui concerne la valeur du FRF qu'on note par δ. En effet, ce paramètre joue un rôle très important dans la planification des réseaux cellulaires : avec un grand δ, la distance entre les cellules interférentes devient plus grande et par conséquent, les interférences intercellulaires sont réduites tout en assurant une meilleure couverture. Cependant, cela engendre plus de partage en termes de ressources fréquentielles entre les cellules d'un seul motif (c-à-d entre δ cellules) tout en diminuant la quantité de bande passante allouée à chaque BS. En outre, moins d'utilisateurs seront acceptés dans le réseau en plus de la dégradation de la QoS offerte dans le cas d'un réseau surchargé.

1.3.1 La réutilisation unitaire des fréquences

Il existe plusieurs approches permettant aux planificateurs des réseaux radios mobiles de répartir le spectre entre les cellules. Ces approches dépendent fortement de la stratégie de chaque opérateur. Pour résoudre le problème de la rareté des ressources fréquentielles tout en garantissant une utilisation efficace du spectre, la manière la plus simple de répartir la bande passante est la réutilisation unitaire des fréquences (frequency reuse one ou Reuse 1). Dans cette approche, la totalité de la bande passante disponible est réutilisée dans les multiples cellules : lors du déploiement du réseau, toute la bande est allouée à chaque BS, c'est-à-dire, elles sont autorisées à émettre sur la même partie du spectre. La figure 1.2 illustre ce mode de déploiement [28] en voie descendante : les septs cellules utilisent la totalité de la bande passante disponible avec le même niveau de puissance de transmission par sous-porteuse. En outre, tout le spectre est disponible pour toutes les cellules afin qu'il soit alloué aux utilisateurs. Cependant, cela engendre une forte augmentation des interférences intercellulaires qui se répercutent au niveau des utilisateurs. En effet, la puissance du signal reçu sera fortement dégradée, en particulier pour les mobiles qui se situent aux bords des cellules [28].

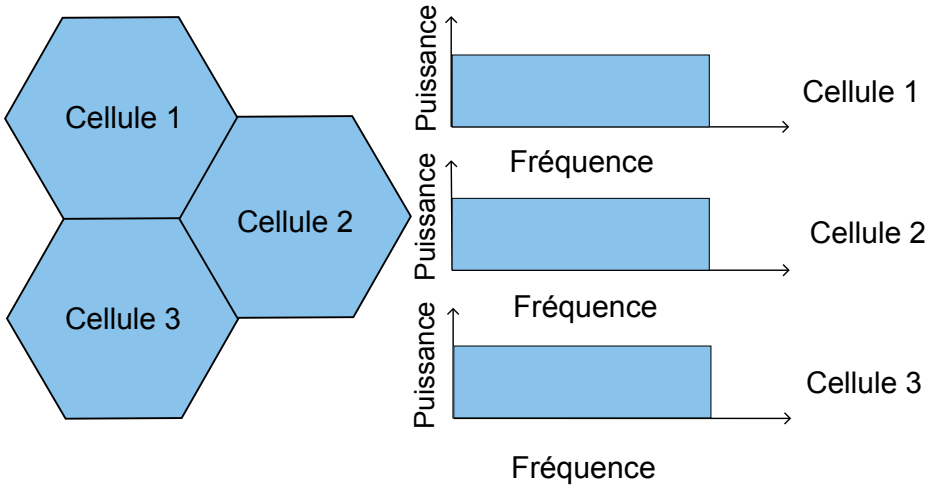


FIGURE 1.2 – L'approche Reuse 1.

1.3.2 La notion d'interférence

En plus des phénomènes que nous avons décrits précédemment responsables des atténuations au niveau de la puissance du signal reçu, d'autres perturbations affectent sévèrement le canal de transmission comme les interférences crées par des transmissions différentes du signal attendu et le bruit thermique causé par les équippemnts électroniques au niveau de la réception.

Ainsi, on définit la *qualité du canal* par le *rapport signal sur interférence et bruit (Signal to Interference and Noise Ratio, SINR)* :

$$SINR = \frac{Puissance\ du\ signal\ utile}{Puissance\ des\ interférences + Puissance\ du\ bruit}. \tag{1.1}$$

La puissance du signal utile dépend généralement du pathloss, du shadowing et des fadings ainsi que de la puissance de transmission. Plusieurs sortes d'interférences viennent s'ajouter [25] au bruit thermique telles que :

- l'interférence entre symboles mais uniquement en voie montante puisque, comme nous le verrons plus tard, la technique de modulation OFDM élimine ces perturbations.
- l'interférence intra-cellulaire c-à-d quand plusieurs utilisateurs séparés dans l'espace, sont servis en voie descendante avec les mêmes ressources temps-fréquences.
- l'interférence inter-cellulaire causé par les cellules voisines.

Dans notre thèse, on s'intéresse particulièrement à l'interférence inter-cellulaire puisqu'elle influe fortement sur les performances du système ainsi que sur la couverture du réseau. En effet, le signal d'un mobile se situant à la bordure de son eNodeB serveur est soumis non seulement aux pertes de propagation mais aussi à de fortes interférences intercellulaires puisqu'il est plus proche des cellules voisines. Ceci constitue une caractéristique fondamentale des réseaux cellulaires : un utilisateur loin de sa station de base expérimente une QoS moindre que celle d'un mobile situé proche de son antenne de transmission si aucune politique efficace de gestion des interférences n'est appliquée. Cependant, il existe des algorithmes d'ordonnancement [2] permettant de réduire cet écart en allouant plus de ressources aux utilisateurs lointains mais au détriment de la capacité de la cellule. En fait, moins de données seront transmises sur ces ressources supplémentaires que dans le cas où ils auraient été allouées aux utilisateurs proches.

1.3.3 Motif de réutilisation des fréquences

Dans le GSM, l'allocation des fréquences prend en considération plusieurs facteurs dont les plus importants sont la couverture radio, l'estimation des interférences et la distribution du trafic [29]. Chaque cellule utilise une partie du spectre différent de sa voisine. La bande passante disponible est divisée en n sous-bandes orthogonales et chaque cellule émet sur chaque sous-bande. Cela implique bien évidemment une réutilisation du spectre dans des cellules distantes. Dans ce cas, n est appelé facteur de réutilisation et peut être écrit sous la forme : $n = i^2 +$

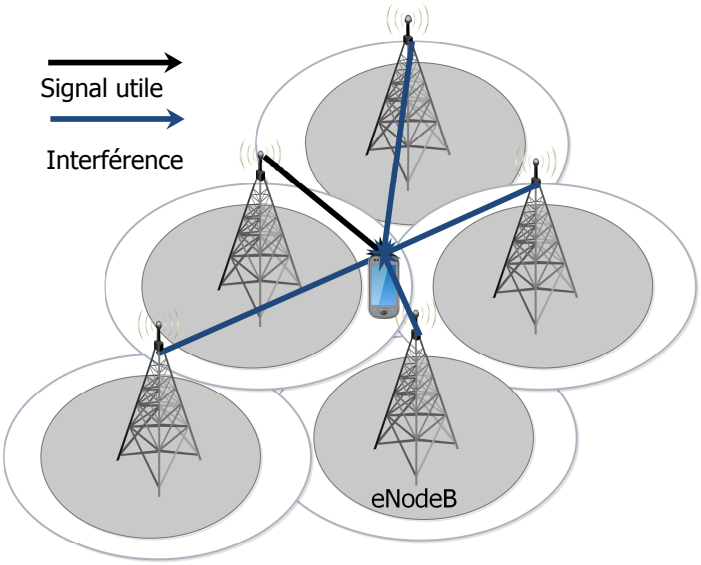


FIGURE 1.3 – L'interférence intercellulaire.

$ij + j^2$, où i et j sont des entiers. Un exemple de la technique reuse-n est le reuse-3 où la bande est divisée en trois parties allouée selon trois groupes comme le montre la figure 1.4. Par conséquent, le nombre total de sous-porteuse par cellules est égale à $K/3$ avec K le nombre total des sous-porteuses disponibles dans tout le système. Le plus grand intérêt derrière l'emploi de la reuse-n est la diminution des interférences intercellulaires et ce en interdisant l'utilisation de la même partie du spectre entre cellules voisines. D'autre part, plus le facteur de réutilisation augmente, plus les interférences intercellulaires diminuent. Cependant, cette diminution se fait au détriment de l'efficacité spectrale [30]. En effet, chaque cellule se verra attribuer seulement une partie de l'ensemble du spectre disponible ce qui engendre la diminution du nombre de sous-porteuses disponibles et donc une diminution de la capacité du système.

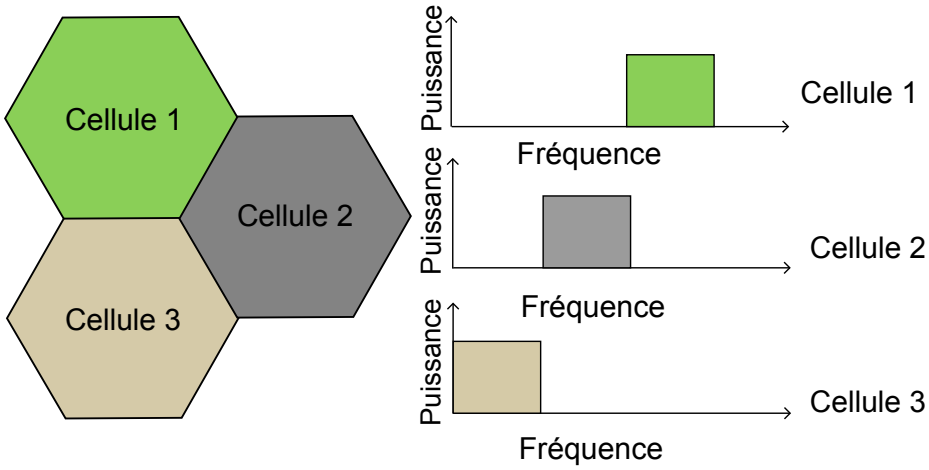


FIGURE 1.4 – L'approche Reuse 3.

1.4 Allocation de ressource intracellulaire

1.4.1 OFDM

La technique de modulation OFDM [31, 32, 33] a été introduite afin de remplacer les modulations monoporteuses qui sont fortement influencées par les distorsions introduites par le canal de transmission. En effet, l'augmentation du débit de transmissions avec ces techniques classiques nécessite de mettre en œuvre des techniques d'égalisation complexes et coûteuses. Une solution à cette problématique serait d'augmenter la largeur du spectre fréquentiel mais cela a pour effet de rendre le canal sélectif en fréquence. Dans ce cas, dans le domaine temporel, le canal est caractérisé par une réponse impulsionnelle non plate et par conséquent, la puissance du signal émis va subir de fortes atténuations qui varient selon la fréquence (figure. 1.5), le temps et la position de l'utilisateur.

Dans ce contexte, la technique de modulation OFDM a eu un large succès dans le milieu académique et industriel. L'idée derrière l'emploi de cette solution est de répartir l'information sur plusieurs sous-porteuses orthogonales. En effet, la bande passante est subdiviée en N sous-bandes ou sous-porteuses (subcarriers). Ensuite, la suite de symboles à transmettre de durée T_s est divisée en N sous-suites chacune de durée $T = N \times T_s$. Finalement, chaque sous-suite est émise sur une sous-porteuse différente.

Le signal portant l'information est ainsi réparti sur plusieurs sous-canaux ayant chacun une largeur de bande étroite tout en étant inférieur à la bande de cohérence du canal. Pour chaque sous-bande, la réponse fréquentielle du canal peut être considérée comme constante (plate) et par conséquent, ces sous-canaux ne sont pas sélectifs en fréquence réduisant ainsi le risque de perdre l'information et la distorsion du signal.

1.4.2 Les ressources physiques en LTE

L'allocation des ressources en LTE se fait à la fois dans le domaine temporel et fréquentiel. Dans le domaine temporel, l'opération de l'interface radio en voie descendante est divisée en trames de 10 ms chacune. De même, une trame radio est divisée en 10 sous-trames appelées TTI (transmission time intervalle) de durée 1 ms chacune. Chaque sous-trame est découpée en deux intervalles de temps (time slots) de 0.5 ms chacune. D'autre part, dans le domaine fréquentiel, la bande passante du système est divisée en sous-bandes de 180 kHz. Chacune de ces sous bandes est composée de 12 sous-porteuses espacées régulièrement de 15 kHz. Les ressources physiques dans le domaine temporel et fréquentiel sont appelées Ressource Block (RB). Un RB dure 0.5 ms soit un slot et est constitué de symboles OFDM (6 ou 7 symboles selon la durée du préfixe cyclique utilisé). Chaque symbole OFDM est composée de symboles de modulations appelés

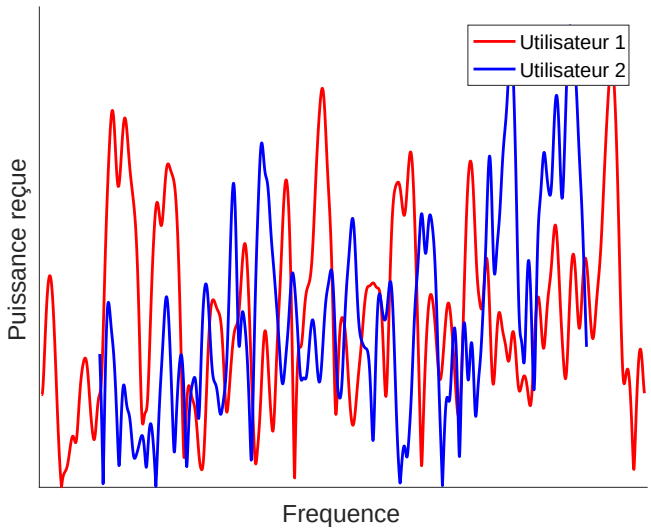


FIGURE 1.5 – Canaux sélectifs en fréquence.

unité de ressource (UR) (ou élément de ressources (RE)) [25, 34, 35] : en OFDM, une unité de ressource porte un symbole de modulation. Ainsi, le système peut être modélisé par une grille dans le repère temps fréquence comme le montre la figure 1.6.

Le nombre de RB dans une grille de ressources dépend de largeur de bande passante disponible. En LTE, la largeur de bande varie de 1.4 MHz à 20 MHz comme le montre le tableau 1.1.

TABLE 1.1 – Nombre de sous-porteuse et de RB en fonction de la largeur de bande [6].

Bande (MHz)	1.4	3	5	10	15	20
Nombre de sous-porteuses occupées	72	180	300	600	900	1200
Nombre de ressources block	6	15	25	50	75	100

1.4.3 L'adaptation de lien

Le niveau de protection apporté aux symboles émis est déterminé par une modulation et un rendement de codage, qui constituent un schéma de modulation et de codage appelé MCS (Modulation and Coding Scheme). Pour ce faire, la station de base émet à l'utilisateur des signaux dits de références qui vont lui permettre de mesurer l'indicateur de qualité du canal (Chanel Quality Indicator CQI) à partir d'une estimation du rapport signal à bruit. Le CQI est transmis ensuite vers la station de base. Ce dernier prend des valeurs entre 0 et 15 et dépend du

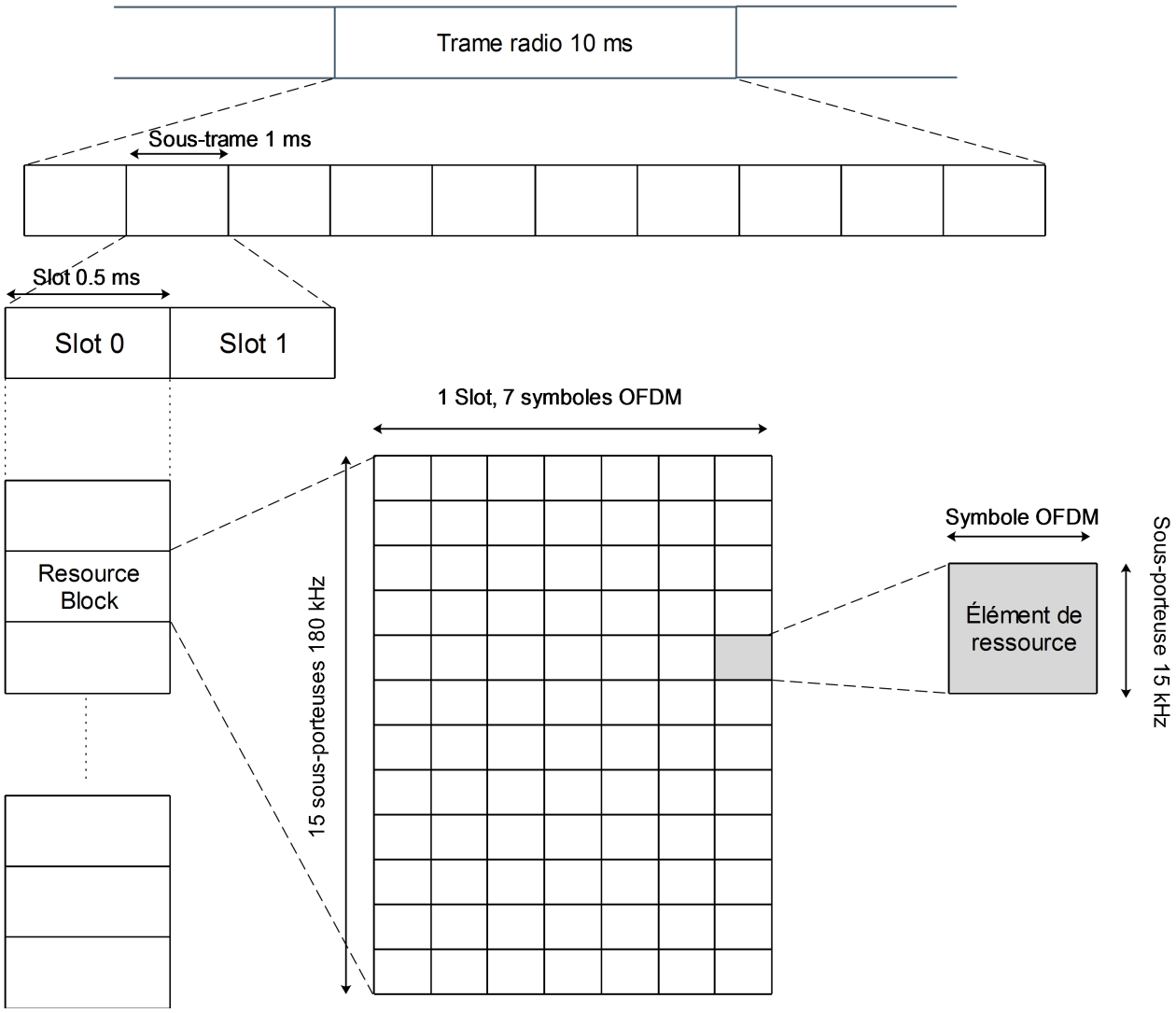


FIGURE 1.6 – Grille de ressources temps fréquence pour le système LTE.

niveau du SINR qui, plus il est élevé, plus le CQI est élevé.

Dans la pratique, le débit de transmission des données est contrôlé en ajustant le mécanisme de modulation et/ou le rendement du codage canal (MCS). Dans le cas d'avantageuses conditions de liaison radio, le rapport signal à bruit au niveau du récepteur est élevé et donc, la bande passante allouée au canal est la principale contrainte empêchant d'avoir un haut débit de transmission. Par conséquent, pour pouvoir atteindre des débits élevés, les modulations d'ordre supérieur sont privilégiées telles que la 16QAM ou la 64QAM en plus de l'utilisation d'un rendement de code élevé. Par contre, en cas de mauvaises conditions de transmissions, la modulation QPSK et le codage à faible rendement sont employés ce qui a pour effet de diminuer le débit offert à l'UE par rapport au premier cas [34]. Dans le standard 3GPP LTE, le tableau 1.2 représente le mapping entre les différentes valeurs du rapport signal à bruit SINR et les MCS.

TABLE 1.2 – Schéma de Modulation et de Codage [7].

CQI	Type de modulation	Rendement du code	SINR
0	-	-	-
1	QPSK	0.076	-7.27
2	QPSK	0.12	-4.67
3	QPSK	0.19	-2.06
4	QPSK	0.3	0.61
5	QPSK	0.44	2.81
6	QPSK	0.59	4.69
7	16QAM	0.37	6.29
8	16QAM	0.48	8.69
9	16QAM	0.6	11.37
10	64QAM	0.45	13.11
11	64QAM	0.55	16.44
12	64QAM	0.65	19.62
13	64QAM	0.75	23.01
14	64QAM	0.85	26.19
15	64QAM	0.93	28.66

1.4.4 Principes généraux des ordonnanceurs intracellulaires

Afin de répondre aux exigences de plus en plus croissantes des réseaux sans fils, la technique de modulation OFDM ne suffit pas à elle seule. En effet elle doit être combinée avec des algorithmes d'allocation de ressources efficaces qu'on appelle ordonnanceur (intracellulaire) ou scheduler en anglais. Ces algorithmes profitent de la grande flexibilité qu'offre l'OFDM dans le but d'augmenter significativement les débits tout en fournissant un bon niveau d'équité. En effet, l'ordonnanceur intracellulaire (figure 1.7) gère l'accès aux canaux partagés par plusieurs utilisateurs. Cet accès se fait généralement en fonction de paramètres QoS mais aussi en fonction de l'état du canal expérimenté par chaque utilisateur. Ainsi, le rôle du scheduler intracellulaire est de décider des paramètres suivants [25] :

- Choisir à chaque TTI l'utilisateur qu'il faut servir.
- Déterminer le nombre et la position des ressources fréquentielles (Ressources Block RB) à allouer pour chaque utilisateur.
- Déterminer la puissance de transmission à appliquer principalement en voie montante.
- Pour un système MIMO (Multiple-Input Multiple-Output), déterminer le traitement spatial à appliquer pour chaque mobile (combien de couche spatiale utiliser et le précodage associé).

L'ordonnanceur se situe au niveau de la couche MAC de l'eNodeB et utilise les indicateurs de qualité du canal reportés par la couche physique des utilisateurs/stations de base dans le but d'optimiser le partage des ressources radios. Ainsi, la classe de fonction qui assure l'ordonnancement est conçue selon une approche inter-couche c.-à-d. entre la couche physique et la couche MAC. Son exploitation constitue une caractéristique clé des réseaux sans fil modernes et en particulier du LTE. La classe des algorithmes d'ordonnancement opportunistes a émergé afin de répondre à ces besoins. Ces derniers emploient d'une manière intelligente les informations sur les états des liens (CQI) afin d'adapter le débit de chaque transmission à la variation de l'état du canal radio. Dans ce contexte, ils permettent de tirer avantage des dimensions fréquentielles et temporelles tout en assignant judicieusement les ressources fréquentielles aux mobiles ayant les conditions de transmission/réception les plus favorables maximisant ainsi le débit global du système.

1.4.4.1 Dimension temporelle

Comme nous l'avons dit précédemment, la transmission de données se fait à travers des canaux partagés entre plusieurs utilisateurs. En effet, les demandes des mobiles en termes de ressources radios varient en fonction des services requis. Par exemple, pour un appel voix, nous avons plusieurs périodes de silence durant lesquelles aucune donnée n'est transmise. Ainsi, allouer des ressources pendant ces périodes constituent un gâchis puisqu'elles peuvent être allouées à d'autres mobiles actifs. Il est donc plus intelligent de partager ces canaux entre plusieurs utilisateurs et de leur allouer les ressources en fonction de leur besoins instantanés.

De plus, la diversité multi-utilisateur constitue un autre avantage important apporté par cet accès partagé. En effet, cela se traduit par l'exploitation des variations rapides (fast fading) du canal de transmission dans le but de servir les utilisateurs durant les instants où ils possèdent un type d'évanouissement constructif. Cependant, les évanouissements rapides affectent d'une manière indépendante les canaux de transmission des utilisateurs. Donc, plus les mobiles actifs

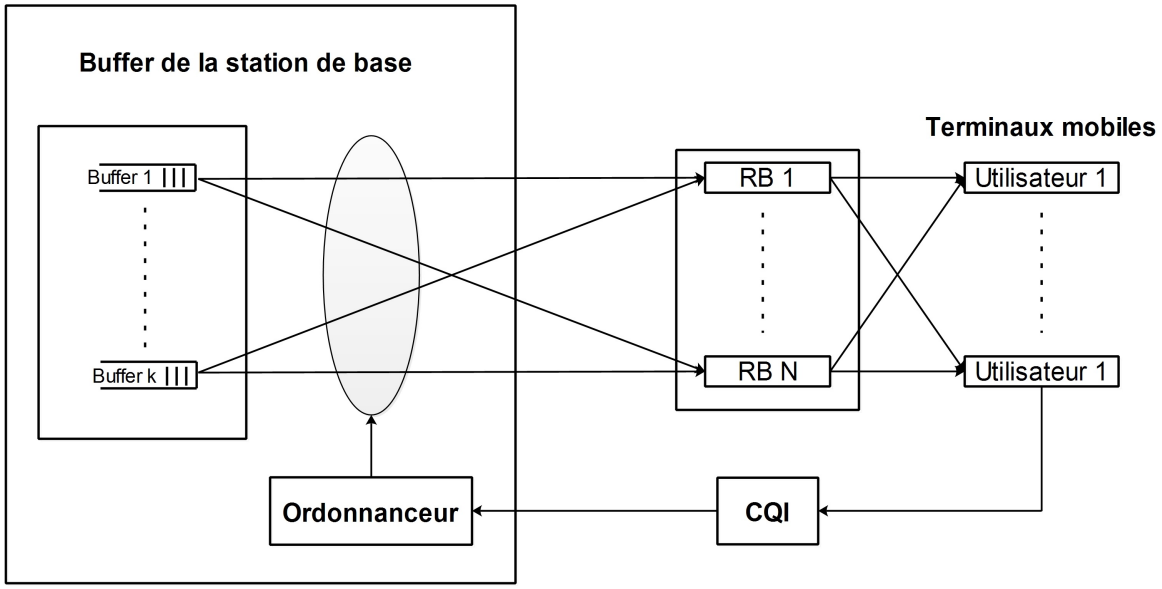


FIGURE 1.7 – Fonctionnement de l'ordonnanceur pour les réseaux radios mobiles [1].

sont nombreux, plus la probabilité d'avoir un canal constructif de l'un d'eux est grande. Ainsi, pour un grand nombre d'utilisateurs actifs simultanés, la qualité du canal de transmission des mobiles servis peut être meilleure que la moyenne. En outre, ces utilisateurs bénéficient d'un débit plus élevé sur les ressources allouées. Par conséquent, la capacité du système devient plus grande étant donné que les ressources allouées peuvent transporter une plus grande quantité d'information. Enfin, pour récapituler, plus le nombre d'utilisateurs augmente, plus le débit transmis augmente et donc, la capacité du réseau augmente.

Ce type d'ordonnancement qui exploite les variations rapides du canal est appelé ordonnancement dynamique ou opportuniste. Dans ce cas, l'ordonnanceur alloue les ressources temporelles d'une manière brève. Par exemple, l'allocation des ressources pour le LTE a une granularité d'une milliseconde ce qui correspond à 1 sous-trame (TTI). En fait, l'ordonnanceur a la liberté de choisir quel utilisateur servir avec quel RB à chaque sous-trame.

1.4.4.2 Dimension fréquentielle

L'ordonnanceur intracellulaire exploite aussi les variations du canal de transmission dans la dimension fréquentielle tout comme il le fait pour la dimension temporelle. Pour ce faire, il va allouer les RBs aux utilisateurs ayant les conditions radios les plus favorables. Ce type d'ordonnanceur est appelé ordonnancement *sélectif* ou *adaptatif* en fréquence. Il s'agit là aussi d'allouer la RB à l'utilisateur qui va en tirer le meilleur profit. Enfin, nous tenons à signaler que c'est grâce à cette dimension fréquentielle exploitée par l'ordonnanceur, les techniques permettant la coordination de l'interférence entre cellules voisines peuvent être implémentées

(techniques ICIC du chapitre 3).

1.4.5 Les stratégies de l'ordonnancement

Le choix de l'implémentation des algorithmes d'ordonnancement est laissé aux constructeurs et ils ne sont pas normalisés. En fait, ces algorithmes ne nécessitent pas un interfonctionnement avec d'autres équipements. Toutefois, ces ordonnanceurs, quelles que soient leurs modes de fonctionnement, ils visent à maximiser certains critères de performances en respectant un nombre de contraintes données. Par exemple, un ordonnanceur peut maximiser la capacité de la cellule sous la contrainte d'assurer une latence et/ou un débit garanti aux utilisateurs suivant le service qu'ils requièrent.

Afin d'évaluer l'intérêt pratique des algorithmes d'ordonnancement, la notion d'équité est souvent utilisée. Elle modélise la capacité de l'ordonnanceur à servir les utilisateurs du réseau dans des proportions semblables (ne pas privilégier certains utilisateurs sur d'autres). Cependant, une équité absolue qui offre un même débit à tous les utilisateurs n'est pas tout à fait souhaitable car cela peut avoir un impact sur la capacité du système. En effet, réserver le même nombre d'unités de ressources ou allouer un même débit à un ensemble d'utilisateurs n'est pas optimale. En fait, il serait plus efficace de tenir compte des conditions de transmission les plus favorables de certains utilisateurs pour leur transmettre leurs données demandées et ensuite, libérer ces ressources et les allouer à d'autres.

Dans la littérature, nous retrouvons plusieurs algorithmes d'ordonnancement intracellulaires dont les plus utilisés et connus sont :

- L'ordonnanceur Round Robin [2] : il consiste à allouer à tour de rôle les ressources radios aux utilisateurs sans tenir compte de leurs conditions radios. Cet ordonnanceur est le plus équitable du point de vue quantité d'unité de ressources allouées, mais, il n'est pas efficace en termes de maximisation de la capacité du réseau puisqu'il ne tire pas profit de la variation des conditions de transmission.

- L'ordonnanceur Maximum Signal-to-Noise Ratio (MaxSNR) [36] : avec le MaxSNR, la ressource radios est allouée à l'utilisateur possédant le meilleur rapport signal à bruit. Ce type d'ordonnanceur va toujours privilégier les mobiles proches de la station de base en leur donnant une priorité disproportionnée sur les mobiles éloignés. Ainsi, quand le réseau est congestionné, la majorité des ressources fréquentielles sera allouée à ces utilisateurs proches tandis que le reste se verra attribué que des résidus. Ainsi, nous pouvons dire que cet ordonnanceur maximise le débit global du système mais, en même temps, il accentue l'iniquité du réseau.

- Le Proportional Fair (PF) [37] : Cet ordonnanceur tend à introduire un certain niveau d'équité tout en gardant les avantages du MaxSNR en termes de maximisation du débit. Pour ce faire, il tient compte à la fois du SNR de chaque utilisateur ainsi que du débit que les mobiles actifs auraient reçu aux instants précédants. Cependant, un inconvénient majeur n'est pas encore résolu. En fait, cet algorithme comme pour tous les autres ordonnanceurs précédemment cités, ne font pas de différenciation de service. Ainsi, il est impossible de gérer les utilisateurs ayant un type de trafic non-uniforme avec des débits variables et/ou de différentes contraintes de QoS telles que le retard minimal à ne pas dépasser. De ce fait, il n'est pas adapté aux services multimédias [2].

Plusieurs travaux de recherches ont été menés ces dernières années et ont abouti à des ordonnanceurs ayant des performances proches de l'optimale. Cependant, ces algorithmes ne permettent pas de fournir une QoS acceptable durant les périodes de surcharge de la cellule. En effet, la quantité d'unité de ressource disponible au niveau du scheduler peut être insuffisante afin de servir l'ensemble de tous les utilisateurs. De plus, ces solutions ne peuvent pas résoudre la problématique de la répartition non-uniforme de la charge entre cellules voisines. Dans ce cas, nous devons envisager de nouveaux algorithmes situés à l'échelle multicellulaire. Ces ordonnanceurs intercellulaires auront pour tâche d'allouer/réallouer la bande passante disponible entre les cellules afin d'équilibrer la charge du système.

1.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un état de l'art sur les bases des transmissions sans fil. Nous nous sommes focalisé sur les mécanismes de gestion des ressources radios à travers les ordonnanceurs intracellulaires. Ces derniers ont pour rôle d'optimiser le partage des ressources fréquentielles entre les utilisateurs de chaque cellule. Plusieurs travaux de recherches ont été menés dans le domaine de l'ordonnancement et ont abouti à des ordonnanceurs ayant des performances proches de l'optimal. Cependant, ces algorithmes ne sont pas efficaces lors des périodes de surcharge des cellules. Dans ce contexte, un ordonnanceur situé à l'échelle multicellulaire doit être proposé. Cet algorithme exploite la distribution non-uniforme des utilisateurs dans le réseau afin de transférer dynamiquement la bande passante des cellules en sous-charge vers les cellules en difficulté. Cette bande passante additionnelle permet à la cellule congestionnée d'absorber ses pics de trafic ce qui améliore la QoS fournie à ses utilisateurs

CHAPITRE 2

ORDONNANCEMENT MULTICELLULAIRE

Sommaire

2.1 Introduction **24**

2.2 État de l'art **24**

2.3 Inter-Cellular Bandwidth Fair Sharing scheduler (IBFS) **27**

2.3.1 Problématique et approche adoptée 27

2.3.2 L'algorithme Inter-Cellular Bandwidth Fair Sharing scheduler (IBFS) 29

2.3.3 Évaluation de performances 33

2.4 Le Dynamic Inter-cellular Bandwidth Fair Sharing Scheduler (DIBFS) . **47**

2.4.1 Limites de l'IBFS 47

2.4.2 Description du DIBFS 48

2.4.3 Évaluation de performances 52

2.5 Conclusion **59**

2.1 Introduction

La gestion optimale des ressources radio constitue un des plus grands enjeux des opérateurs radio-mobiles. En effet, ils doivent répondre à une demande vertigineuse en termes de service multimédias sans fil ainsi qu'à un trafic de données qui ne cesse de croître d'une manière exponentielle. De plus, cette croissance des demandes constitue un défi à relever vue la rareté du spectre fréquentiel. Dans ce contexte, il est impératif d'en faire un bon usage. Les algorithmes opportunistes d'ordonnancement intracellulaire [20, 21, 22, 23] combinés avec les modulations et le codage adaptatifs permettent d'allouer la bande entre les utilisateurs dans une cellule donnée tout en optimisant la capacité du réseau. Cependant, ces solutions ne peuvent pas garantir une bonne QoS/QoE quand les cellules sont surchargées. En effet, les utilisateurs sont inégalement répartis entre les différentes zones et donc, nous aurons des cellules en sous-charge tandis que d'autres en surcharge. Dans ce dernier cas, l'ordonnanceur monocellulaire sera dans l'incapacité de pouvoir fournir une bonne QoS. Ainsi, dans le but d'être plus efficace, un nouvel ordonnanceur situé à l'échelle multicellulaire doit être envisagé. Cet algorithme intercellulaire opère sur une échelle de temps plus large que celle de l'ordonnanceur monocellulaire et aura pour tâche le partage dynamique de la bande passante entre les cellules. La distribution non uniforme de la charge sera prise en considération durant le processus d'ordonnancement [38].

2.2 État de l'art

Les schémas d'allocation des ressources sont requis afin d'exploiter efficacement le spectre fréquentiel rare et aussi pour augmenter la capacité du système en termes de trafic. Selon [39], ces derniers peuvent être classés en trois catégories majeures : fixe, dynamique et hybride.

- Allocation de canaux fixes (Fixed channel allocation FCA) : un ensemble nominal de ressources fréquentielles est assigné d'une manière permanente à une cellule donnée. Selon le type de déploiement fréquentiel adopté, ce même ensemble de bande, peut être réutilisé dans d'autres cellules se situant à une distance donnée.

- Allocation dynamique de canaux (The dynamic channel allocation DCA) : la charge de trafic au sein d'un système cellulaire est en pratique caractérisée par des fluctuations temporelle et spatiale à court terme. A cause de ces phénomènes, les schémas FCA ne sont pas capables de fournir une bonne efficacité spectrale. Les schémas DCA ont été introduits afin de faire face à ces problèmes [39]. Les ressources fréquentielles sont mises dans une réserve centrale (central pool) et sont allouées/ré-allouées dynamiquement aux cellules en fonction de leurs besoins. Les ressources fréquentielles sont retournées à la

réserve centrale une fois qu'elles deviennent inactives. Les schémas DCA ont pour but d'assigner les canaux fréquentiels qui minimisent le coût du système tout en gérant les interférences intercellulaires. Finalement, Cette approche peut être soit distribuée soit centralisée.

- Allocation hybride des canaux (Hybrid Channel Allocation HCA) : ce type d'allocation de ressources est une combinaison des schémas FCA et DCA. La bande passante totale est divisée en un ensemble fixe et un ensemble dynamique. L'ensemble fixe contient un certain nombre de ressources fréquentielles allouées à chaque cellule selon la stratégie FCA. L'ensemble dynamique est partagé entre toutes les cellules dans le but d'augmenter la flexibilité.

La nouvelle génération des réseaux cellulaires doit être capable de fournir des services omniprésents avec de très haut débit. Dans ce contexte, l'objectif principal de toutes les stratégies d'allocation de ressources est d'optimiser l'utilisation du spectre fréquentiel qui est à la fois rares et parfois encombré (sur-utilisé). Actuellement, d'intenses travaux de recherches sont conduits dans le domaine de la radio cognitive (RC) afin d'apporter des solutions potentielles pour ce problème de pénurie des ressources fréquentielles [40]. La RC consiste à trouver et à exploiter les parties non utilisées et/ou sous-utilisées du spectre fréquentiel occupé en se basant sur plusieurs techniques telle que le spectrum sensing [41]. De plus la RC apporte d'autres avantages tels que la coordination intercellulaire des interférences, l'équilibrage de charge, l'optimisation de la capacité, etc [42]. Bien que la RC est une technique prometteuse qui accroît la capacité du système, dans notre thèse nous nous focalisons sur le problème de gestion des ressources radios en se basant surtout sur l'ordonnancement fréquentiel combiné avec les stratégies d'allocation dynamiques des ressources.

Dans la littérature, plusieurs techniques d'équilibrage de charge ont été proposées dans le but de faire face au problème la répartition non homogène de la charge entre les cellules. Les auteurs de [43] propose une stratégie simple d'emprunt de la bande (Simple Borrowing strategy (SB)). Selon cette approche, un ensemble nominal de ressources fréquentielles est alloué à chaque cellule. Quand un paquet arrive au niveau de la couche MAC de la station de base, une ressource radio est assignée afin de le servir. Si toutes les ressources sont occupées, une partie de la bande de la cellule voisine est empruntée. Cette technique est appelée en anglais *Channel Borrowing*.

Dans le but de prévenir le système des interférences co-canal (deux cellules voisine émettent sur les mêmes ressources radios), une technique de verrouillage de fréquences (Chanel Locking) a été introduite [44] : quand une ressource fréquentielle est empruntée, les cellules adjacentes qui partagent le même spectre que la cellule donneuse ont l'interdiction de l'utiliser mais, cela

constitue l'inconvénient de cette stratégie. Les résultats montrent que cette technique donne de meilleures performances que le schéma d'allocation de canaux fixe (FCA) mais seulement en considérant une charge faible ou modérée. Dans les cas où les cellules sont surchargées, emprunter des ressources fréquentielles peut entraîner le verrouillage de plusieurs canaux et donc, il peut y avoir une perte élevèe en termes de ressources radios à cause de ce verrouillage. Dans ce cas, les schémas fixes donnent de meilleurs résultats que les stratégies employant les processus d'emprunt de ressources.

Dans [45], les auteurs proposent une stratégie d'allocation de ressources hybride qui combinent à la fois les avantages du FCA et du SB. Dans ce contexte, l'ensemble des ressources fréquentielles assignées à chaque cellule sont divisées son deux sous-ensembles : un ensemble noté A standard et un autre noté B représentant les ressources empruntables. Le sous-ensemble A est allouée nominalement à chaque cellule tandis que le sous-ensemble B est disponible afin d'être empruntée par les cellules adjacentes. Le ratio entre le nombre de ressource fréquentielle dans les sous-ensembles A et B est déterminé a priori en fonction des conditions de la charge de trafic des cellules. En plus, ces ressources peuvent être ajustées dynamiquement d'une manière prédictive ou suite à un ordonnancement [46].

Les auteurs de [47] proposent une stratégie intelligente d'équilibrage de charge qui change dynamiquement la taille de la zone de couverture ainsi que la forme de la cellule selon la distribution géographique du trafic. Les résultats montrent que la solution proposée permet d'augmenter la capacité du système. Cependant ajuster dynamiquement la zone de couverture des cellules peut augmenter le niveau des interférences intercellulaires typiquement pour les utilisateurs situés en bordure. De plus, avec cette technique, les mobiles ont tendance à changer régulièrement leurs connexions aux BS ce qui implique une augmentation du nombre de handovers dans le système cellulaire, et par conséquent, une augmentation du taux de perte des paquets.

Tous les travaux précédemment cités ont été proposés pour les réseaux cellulaires traditionnels et ne sont pas adaptés aux futurs réseaux sans fil. D'abord, ces anciennes techniques supposent l'existence d'un seuil de SINR fixe (adapté pour les applications homogènes comme la voix) mais, les systèmes de communications cellulaires récents emploient des schémas de modulations et de codages adaptatifs. Ainsi, les décisions d'allocation des ressources sont basées sur le SINR expérimenté par les utilisateurs [48] [49]. En effet, différents schémas de modulation et de codage sont utilisés et donc, les utilisateurs peuvent atteindre différents débits qui varient en fonction du niveau de leur SINR. De plus, les mobiles sont caractérisés par des canaux de propagations sélectifs en fréquence et aussi par différentes demandes en termes de QoS. Finalement, les réseaux cellulaires récents ont l'obligation de fournir de haut débits ce qui n'était planifié pour les réseaux cellulaires traditionnelles.

Les auteurs de [50] introduisent un algorithme d'équilibrage de charge qui minimise et ajuste dynamiquement la bande passante maximum disponible entre les cellules au sein d'un cluster. Pour ce faire, les auteurs supposent que les cellules en difficulté (ceux qui ont besoin le plus de ressources) sont ceux qui ont la plus haute charge de trafic. Cependant, dans cette thèse nous démontrons que la charge de trafic n'est pas la métrique optimale caractérisant l'urgence de la cellule à reçevoir plus de bande. Nous proposons une nouvelle métrique de QoS appelée *Mean Cell Packet Delay Outage Ratio* (MCPDOR). Dans ce chapitre nous démontrons que les performances d'un algorithme d'ordonnancement multicellulaire qui sélectionne la cellule à aider en se basant sur ce paramètre surpassent le même algorithme qui se baserait sur la charge de trafic comme métrique.

2.3 Inter-Cellular Bandwidth Fair Sharing scheduler (IBFS)

2.3.1 Problématique et approche adoptée

Fournir des services de communications multimédias mobiles avec une qualité de service adéquate représente un grand défi pour les concepteurs des réseaux cellulaires. Dans ce contexte, un grand intérêt a été porté à la conception des algorithmes d'ordonnancement intra-cellulaire qui améliorent les performances des systèmes OFDM multi-utilisateurs [20, 21, 22, 23]. Les techniques d'ordonnancement opportunistes prennent en considération les avantages apportés par la diversité multi-utilisateur en allouant préférablement, à un instant donné, les ressources au mobile actif ayant les conditions de transmissions les plus favorables parmi tous les mobiles d'une BS. Ces algorithmes d'ordonnancement ont été introduits au début afin d'être utilisés dans les systèmes de communications radios mobiles employant des techniques de transmissions mono-porteuses [51] mais aujourd'hui, les ordonnanceurs opportunistes sont largement exploités au sein des systèmes de transmission à sous-porteuses multiples [52, 53]. Ces algorithmes sont dérivés du Maximum Signal-to-Noise Ratio (MaxSNR) qui comme son nom l'indique, alloue la ressource à un instant donné au mobile ayant le meilleur SNR. En plus, l'adaptation dynamique des schémas de codages et de modulations (MCS) permet à l'ordonnanceur d'avoir une gestion efficace de la ressource radio et donc, rapproche le système de la capacité de Shannon. Cela n'est valable que d'un point de vue théorie de l'information. Cependant, bien que l'ordonnancement inter-cellulaire est très efficace, la QoS et la QoE ne peuvent pas être garanties quand la cellule considérée devient surchargée. Par conséquent, De nouvelles stratégies sont requises dans le but de décongestionner ces cellules en difficulté. Dans ce sens, les futurs systèmes de communications doivent donc être conçues de telle sorte qu'ils puissent servir un nombre maximum d'utilisateurs. Par exemple, un débit de plusieurs centaines de Mbit/s doit

être fourni pour plusieurs dizaines de milliers d'utilisateurs dans des zones étroites par la taille comme des stades de foot ou des espaces événementiels ouverts [54]. Un autre exemple est de pouvoir fournir un débit de 1 Gbit/s pour une centaine d'utilisateurs se situant dans un même étage d'un immeuble. Par conséquent, la 5G doit gérer un très grand nombre de connexions par mètre carré avec une énorme densité de traffic. De plus, elle doit être capable de fournir un retard de bout en bout égale à 10 ms en général et un retard égale à 1 ms pour les cas extrêmes qui requièrent une latence extrêmement faible [55]. Ainsi, de nouvelles techniques sont requises afin de gérer plus efficacement le spectre disponible et de satisfaire ces exigences de QoS.

Dans cette partie, nous présentons un ordonnanceur intercellulaire permettant d'améliorer la QoS des réseaux radios mobiles futurs. Notre solution s'appelle Inter-Cellular-Bandwidth Fair sharing scheduler (IBFS). Elle distribue équitablement la bande passante disponible entre les cellules tout en tenant compte de leurs difficultés à pouvoir satisfaire une bonne QoS à leurs utilisateurs. La solution proposée sélectionne dynamiquement la cellule surchargée afin de lui allouer éventuellement plus de ressources radios provenant de la bande passante non utilisée des cellules voisines. Par conséquent, plus de sous-porteuses seront allouées à la cellule surchargée ce qui va lui permettre d'absorber ses pics de trafics et de diminuer le pourcentage d'utilisateurs insatisfaits. Ce processus s'effectue sans pénaliser les cellules donneuses qui conserveront une quantité adéquate d'unités de ressources afin de satisfaire les besoins de leurs utilisateurs.

D'autre part, une discussion sera menée à propos de la métrique à utiliser pour sélectionner la meilleure cellule candidate qui va recevoir une bande additionnelle de ses voisines. En effet, il peut sembler logique de considérer la charge de trafic globale de la cellule comme métrique, cependant, nous démontrons que ce n'est pas optimal. En fait, vue la large gamme de services offertes, les utilisateurs dans les réseaux cellulaires modernes sont caractérisés par différents types de trafic (plus ou moins élastique) ainsi que par de divers applications ayant des contraintes temporelles différentes. Les ordonnanceurs intracellulaires des cellules ayant un type de trafic plus élastique ou des contraintes de QoS plus restrictives ont une tâche plus difficile pour fournir une bonne QoS. Ils pourraient avoir besoin de plus de bande que les ordonnanceurs des autres cellules ayant une demande globale plus forte en termes de charge mais, des contraintes QoS moins restrictives ou de faibles pics de débit. Par conséquent, l'ordonnanceur IBFS se base sur une métrique plus adéquate qui constitue un paramètre crucial pour ses performances. Dans nos travaux, nous avons introduit une nouvelle métrique appelée *Mean Cell Packet Delay Outage Ratio* (MCPDOR) afin de mesurer l'urgence de la cellule à accéder à plus de ressources radios et aussi, afin de toujours prendre la meilleure décision en sélectionnant la cellule à aider.

2.3.2 L'algorithme Inter-Cellular Bandwidth Fair Sharing scheduler (IBFS)

Dans cette partie, nous décrivons le cœur de l'algorithme IBFS consistant à partager équitablement la bande entre les différentes cellules. Nous avons proposé notre solution en deux versions : la première s'appelle $IBFS_{load}$ consiste à aider la cellule ayant la plus grande charge de trafic (définit comme étant la quantité totale de données que les utilisateurs de la cellule veulent recevoir). La deuxième version appelée $IBFS_{MCPDOR}$ consiste à aider les cellules ayant le plus grand MCPDOR. Dans ce qui suit, nous portons une discussion sur le MCPDOR afin de prouver pourquoi les performances de l'$IBFS_{MCPDOR}$ dépassent ceux de l'$IBFS_{load}$. Dans la section 2.3.2.2 nous décrivons le processus de fonctionnement de notre algorithme IBFS ainsi que les différents paramètres utilisés à travers cette description.

2.3.2.1 Le Mean Cell Packet Delay Outage Ratio (MCPDOR)

Sélectionner la cellule à aider comme étant celle qui possède la plus grande charge de trafic (la solution $IBFS_{load}$) n'est pas optimal. En effet, l'objectif crucial des récentes technologies telles que la LTE, la LTE-A et la 5G est de pouvoir supporter tous type de trafics multimédias comprenant une très large gamme de services [56] : VoIP, vidéo-conférences, email, transfert de gros volumes de fichiers, le streaming, etc. Cela requiert bien évidemment une coexistence entre les trafics ayant de fortes contraintes en termes de délai et les trafics de type élastiques n'ayant pas d'aspect temps réel et pouvant tolérer des retards moins contraignants. Dans ce contexte, la tâche la plus difficile pour l'ordonnanceur monocellulaire est la gestion des flux qui possèdent des contraintes de délais très strictes.

Étant donné la large gamme de services que les futurs systèmes de communications sont susceptibles de pouvoir gérer, il serait alors possible que les cellules possédant les plus grandes charges de trafic ne soient pas nécessairement celles qui possèdent la plus pire qualité d'expérience (QoE). D'autres cellules avec des charges de trafics moins importantes peuvent avoir des mobiles utilisant des applications plus sensibles au retard avec des flux plus élastiques. Dans ce cas, la solution $IBFS_{load}$ ne va pas aider la cellule qui expérimente la pire QoE.

Une meilleure solution est de considérer la cellule qui possède le plus de difficultés à satisfaire ses utilisateurs. Cependant, mesurer la satisfaction des utilisateurs est une tâche très difficile dans les réseaux modernes. Les applications utilisées sont de plus en plus variées et requièrent de différentes manières de gestions avec de diverses contraintes de QoS comme la jigue, de délai moyen ou le débit garanti. Vu la diversité des applications qui existent, savoir mesurer si une application est satisfaite ou non est une tâche difficile. Dans notre travail, nous avons proposé une nouvelle métrique (Mean Cell Packet Delay Outage Ratio MCPDOR) permettant de mesurer le degré de satisfaction des utilisateurs d'une cellule prenant compte les contraintes

de QoS dans une approche générique. Le MCPDOR ne donne pas d'évaluations sur les problèmes que peut rencontrer un utilisateur dans une cellule, mais il indique si la cellule arrive à satisfaire les contraintes de QoS de ses mobiles ou pas. Dans ce sens, le protocole $IBFS_{MCPDOR}$ sélectionne la cellule à aider grâce au MCPDOR. Cela a pour but d'éviter de commettre des erreurs dans le processus d'ordonnancement multicellulaire et permet toujours d'aider les cellules qui ont le plus besoin.

Le MCPDOR d'une cellule i est défini comme étant la moyenne des paquets qui arrivent hors délai de tous les flux de services des utilisateurs dans la même cellule :

$$MCPDOR_i = \frac{\sum PDOR}{\text{Nombre total de flux de service dans la cellule}}. \tag{2.1}$$

La notion de flux de service est définie par un écoulement de trafic et ses contraintes QoS dans un sens de transmission donné. Un mobile peut avoir plusieurs flux de services à la fois dans le sens montant et descendant. Chaque flux de service possède sa propre file d'attente pour la transmission. Le profil de QoS d'un flux est l'ensemble des paramètres qui caractérisent les contraintes à respecter. Ces paramètres sont caractérisés l'intégrité des données et le retard maximum toléré par les paquets. Par la suite, on désigne par BER_{target}, le taux d'erreur par bit acceptable. Les contraintes de retards maximums autorisées sont spécifiées au niveau des 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 considèrer comme égal au temps d'attente des flux dans les files d'attentes en négligeant les délais de transmission et de propagation. Le retard des paquets peut être directement calculé dans le sens descendant par le point d'accès. Dans le sens montant, ces informations sont connues par l'utilisateur qui calcule le PDOR [2] et le signale régulièrement au point d'accès pour le fonctionnement des ordonnanceurs. Afin de savoir si un utilisateur est réellement satisfait ou pas, le meilleur indice n'est pas le retard moyen des paquets mais plutôt le pourcentage de paquets arrivée en retard afin de servir chaque application. Pour cela, le concept de *delay outage* (excès de retard) a été introduit par [2]. Un flux est considéré en retard lorsque ses paquets expérimentent un délai plus grand qu'un seuil de tolérance T_k spécifique à l'application considérée. Ainsi, le Packet Delay Outage Ratio (*PDOR*) de chaque flux est défini comme étant le pourcentage de paquets qui arrivent après le seuil de tolérance T_k par rapport au nombre total de paquets transmis/reçus :

$$PDOR = \frac{\text{Total des paquets non transmis/reçus à temps (après } T_k)}{\text{Total des paquets tranmis/reçus}}. \tag{2.2}$$

La valeur du PDOR expérimentée est mise à jour durant tout le long de la vie des flux : à

chaque transmission d'un paquet de chaque flux, nous calculons le nombre total de paquets qui ont un délai supérieur au seuil T_k divisé par le nombre total de paquets transmis depuis le début de la connexion. De plus, nous définissons le $PDOR_{target}$ [1] comme étant le ratio maximum de paquets qui peuvent être délivrés après le seuil de délai. Cela représente les contraintes de délai de n'importe quel flux dans une approche générique. La figure 2.1 illustre un exemple de fonction de répartition des temps de retard des paquets d'un flux à un instant donné : plus le PDOR augmente, plus la QoE diminue.

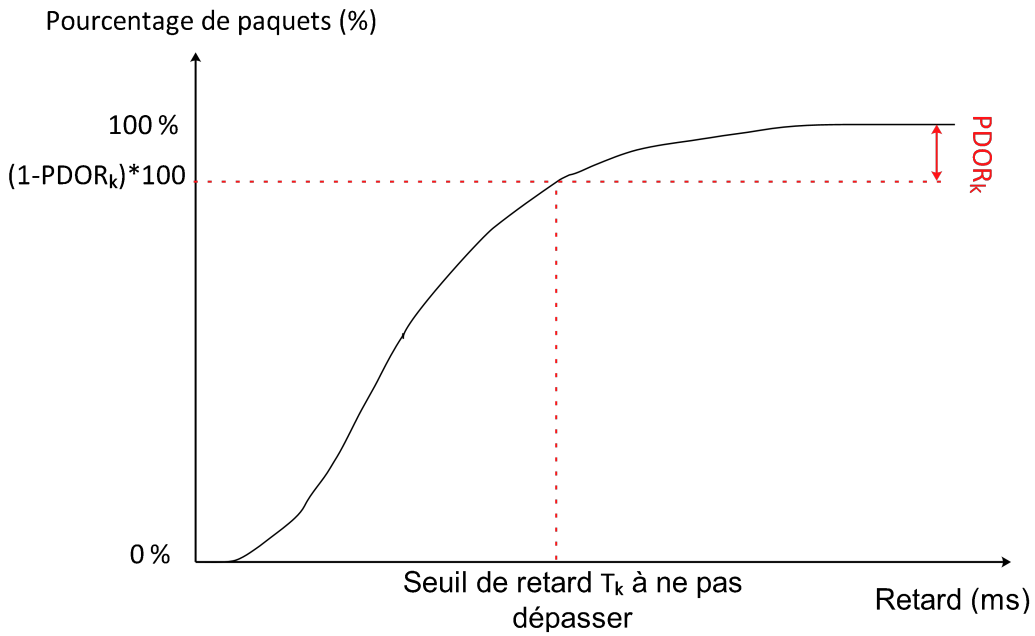


FIGURE 2.1 – Exemple de fonction de répartition des temps de retard des paquets d'un flux et illustration du PDOR [2, 3].

Enfin, nous tenons à préciser que l'objectif principal du protocole $IBFS_{MCPDOR}$ est de réguler le PDOR tout au long de la vie de chaque flux de sorte que chaque valeur reste au-dessus du $PDOR_{target}$ dans chaque cellule. Cela implique la satisfaction des contraintes de délai à court terme.

2.3.2.2 Cœur de l'algorithme

Les différents processus de l'ordonnancement multicellulaire de l'IBFS sont représentés par la figure 2.2 et les définitions des symboles que nous avons utilisés sont représentés dans le tableau 2.1. La solution opère ainsi :

1. un utilisateur est considéré comme insatisfait si ses PDOR dépassent 5% et donc le $PDOR_{target}$ est fixé à cette valeur tout au long de ce travail

- Étape 1 : Pour chaque cellule, l'ordonnanceur intercellulaire rafraîchit les valeurs du MCPDOR pour l'$IBFS_{MCPDOR}$ et respectivement les besoins des cellules en termes de débits pour $IBFS_{load}$. IBFS passe à l'étape suivante.

- Étape 2 : L'algorithme *IBFS* sélectionne la cellule possédant la plus grande valeur de *MCPDOR* pour $IBFS_{MCPDOR}$ et la cellule possédant la plus grande demande de débit pour $IBFS_{load}$. Cette cellule est notée par la lettre r et sera la cellule à aider durant le processus d'ordonnancement. Toutes les cellules dans son voisinage sont potentiellement considérées comme des cellules donneuses. *IBFS* passe à la prochaine étape.

- Étape 3 : Entre toutes les k cellules dans le voisinage de r et pour chaque groupe de bande g différent de celui de la cellule r, $IBFS$ détermine la cellule donneuse leader d_g ayant la portion la plus grande $W_{g(r)}(k)$ de la bande g_r. Cette étape permet de détecter et de sélectionner la cellule donneuse qui aurait reçu précédemment la plus grande part de bande passante de r dans le but de la restituer. Si $W_{g,k}$ n'est pas nul, $IBFS$ passe à la sous-étape 3.1. Sinon, ce groupe ne possède pas de cellule donneuse leader et l'ordonnanceur intercellulaire passe à l'étape 3.2.

  - Sous-étape 3.1 : Pour chaque groupe leader donneur, $IBFS$ restitue depuis d_g une quantité totale de sous-porteuses égale à $Q_{transfert}$ et ce pour la cellule r. Cette restitution se fait aussi depuis d_g aux autres cellules du même groupe que r et voisinant d_g. Cela évite un futur verrouillage potentiel de fréquences. De plus, si les cellules dans le voisinage de r et dans le même group d_g utilisent des sous-porteuses incluses dans cette restitution, $IBFS$ les leurs restituent selon les mêmes règles. $IBFS$ passe à l'étape 4.

  - Sous-étape 3.2 : Si l'algorithme $IBFS$ atteint cette étape, cela veut dire que $IBFS$ va aider r non pas en lui restituant de la bande passante mais en prenant des sous-porteuses des cellules donneuses et ce pour le processus de transfert de fréquences. Cela requiert des vérifications additionnelles. Dans le cas où une cellule ne possède aucun utilisateur dans sa zone de couverture, cette cellule ne doit jamais céder la totalité de son spectre aux cellules voisines sinon elle va disparaître. Pour ce faire, nous avons défini une bande passante minimale W_{min} qui représente la portion de bande passante minimale qu'une cellule doit garder en sa possession durant le processus de transfert de fréquences et ce dans le but d'être toujours capable d'offrir un service minimal. Grâce à W_{min}, si un nouvel utilisateur apparaît, il aura toujours un minimum de ressources fréquentielles lui permettant de se connecter (Si W_{min} n'est pas suffisante, $IBFS$ va partager adéquatement la bande passante disponible entre

les cellules dans les prochaines itérations, et il va allouer plus de ressources radios à cette cellule). Par conséquent, pour chaque groupe de bande g et pour chaque cellule donneuse potentielle k du groupe considéré, l'$IBFS$ vérifie si la bande passante totale $W_{g(k)(k)}$ moins $Q_{transfert}$ est plus grande ou égale à W_{min}. Si cette condition est vérifiée [2], l'$IBFS$ transfère $Q_{transfert}$ depuis la bande de toutes les cellules donneuses pour la cellule r et leur voisins respectifs inclus dans la bande g_r. Sinon, aider r depuis le groupe de bande de cette cellule est impossible et le processus d'ordonnancement va se terminer pour ce groupe sans effectuer de transfert. $IBFS$ passe alors à l'étape 4.

- Étape 4 : Fin du processus d'ordonnancement multicellulaire.

Enfin, pour terminer cette section, il y a un point qui mérite plus de détails. La solution IBFS consiste à aider les cellules qui ont des difficultés en leur allouant plus de ressources fréquentielles à partir de la bande de leurs voisins. Comme nous l'avons décrit dans l'étape 3, la restitution (étape 3.1) doit être toujours favorisée quand c'est possible. En effet, c'est moins coûteux pour le système par comparaison au simple transfert (étape 3.2). Par exemple, si $g_{max} = 3$, donner $Q_{transfert}$ pour aider une cellule veut dire prendre $Q_{transfert}$ de la part des trois cellules voisines de r. Cependant, la restitution veut dire prendre $Q_{transfert}$ à partir du donneur leader ainsi qu'une certaine quantité plus faible ou égale à $Q_{transfert}$ aux autres donneuses.

2.3.3 Évaluation de performances

2.3.3.1 Hypothèses et paramétrage des simulations

Les résultats de l'évaluation de performances ont été obtenus en utilisant un simulateur à événement discret. Nous avons considéré l'OFDM comme technique de transmission de l'interface radio avec 128 sous-porteuses et 5 intervalles de temps par sous-trames de données ce qui va donner 640 URs pour l'ordonnanceur intercellulaire dans chaque cellule. La charge de trafic et les conditions de propagation varient de manière réaliste, indépendamment à travers le temps pour chaque utilisateur dans chaque cellule. D'autre part, nous avons supposé pour chaque sous-porteuse un modèle de canal qui comporte une atténuation en espace libre et un affaiblissement lié aux multi-trajets [14, 15, 16, 17]. Les mobiles sont supposés utiliser des applications vidéoconférences. Ce type de demande génère un grand volume de données avec un

2. Dans le but d'éviter de créer des interférences, une cellule ne peut utiliser des sous-porteuses reçues seulement dans le cas où cette cellule les a reçues de la part de toutes les cellules voisines. Ces dernières ont une bande incluse dans le groupe de bande des sous-porteuses reçues.

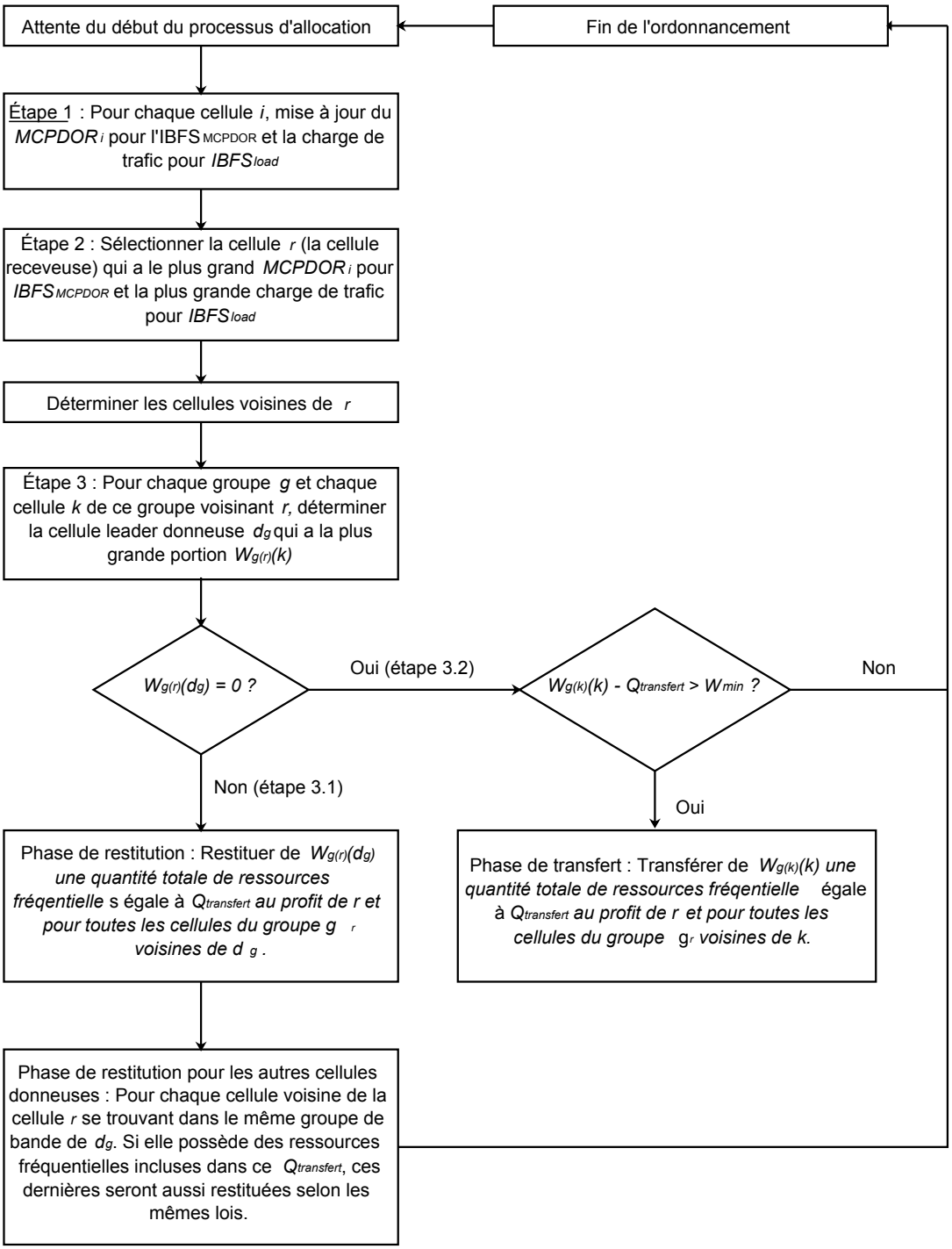


FIGURE 2.2 – Diagramme d'états-transitions de l'IBFS.

trafic sporadique qui requière des contraintes de délai très strictes compliquant la tâche de l'ordonnanceur. Nous supposons que chaque mobile possède uniquement un seul flux : son trafic est composé de vidéo MPEG4 [57] ainsi que de la voix AMR [58]. Le BER_{target} est égale à 10^{-3} et le seuil de délai est égale à 100 ms pour le calcul du PDOR. L'algorithme IBFS est proposé

TABLE 2.1 – Liste des symboles.

Symbole	Définition
d_g	cellule leader donneuse du groupe g
g	indice du groupe des cellules dans un cluster (*i.e.* g est le nombre de groupes des différentes bandes dans un cluster reuse-g)
g_i	groupe de la cellule i
g_{max}	le nombre maximum des différents groupes
i	indice d'une cellule
k	indice des cellules dans un groupe spécifique
r	cellule sélectionnée pour recevoir plus de bande de la cellule donneuse
$W_{g(i)}(k)$	quantité de bande passante appartenant initialement au groupe g de la cellule i et actuellement possédée par la cellule k
W_{min}	quantité de bande passante qu'une celle ne peut céder aux autres.

pour un déploiement reuse-g et il sera comparé pour commencer au traditionnel reuse 3. Le modèle et la forme du réseau cellulaire que nous avons considéré est donné par la figure 2.3.

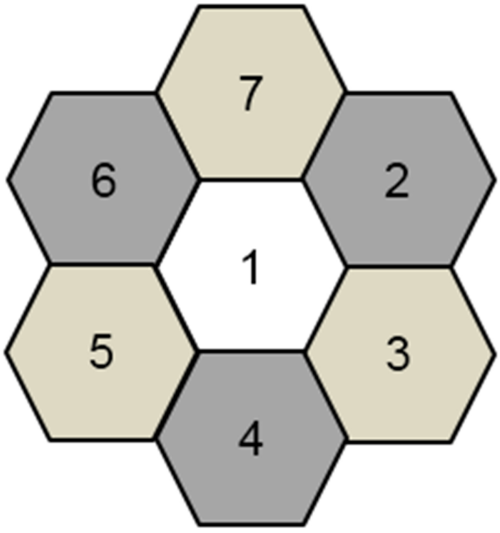


FIGURE 2.3 – Modélisation du réseau cellulaire simulé.

Nous avons choisi le MaxSNR comme ordonnanceur intracellulaire très connu et représenté dans la littérature. Il consiste à allouer en priorité les RUs aux utilisateurs qui ont les meilleures conditions de transmission et de réception. La priorité est donnée à l'utilisateur qui a le plus grand rapport signal à bruit SNR, c'est-à-dire à l'utilisateur qui possède une meilleure efficacité

spectrale permettant d'obtenir un meilleur débit sur une unité de ressource. Mathématiquement, dans un système OFDM, le MaxSNR consiste à allouer un élément de ressource à un utilisateur i telle que :

$$i = argmax_k \, m_{k,n}(t); k = 1...K, \tag{2.3}$$

où $m_{k,n}(t)$ représente le nombre de bits qui peuvent être transmis à un utilisateur k sur une sous-porteuse n. Ainsi, nous pouvons dire que le MaxSNR alloue une sous-porteuse n à un utilisateur k qui a le plus grand $m_{k,n}$. Le paramètre K est le nombre total d'utilisateur dans le système.

Pour calculer les valeurs des $m_{k,n}(t)$, on suppose que $P_r(q)$ est la puissance reçue nécessaire afin de recevoir q bits sur une unité de ressource et ce en respectant le taux d'erreur binaire cible (BER_{target}). Pour une modulation MAQ et un ordre de modulation M (=2^q) au sein d'un canal radio subissant un évanouissement plat (flat fading) [2, 14] :

$$P_r(q) = \frac{2N_0}{3T_s}[erfc^{-1}(\frac{BER_{target}}{2}]^2(M-1), \tag{2.4}$$

où T_s représente la durée d'un symbole OFDM, erfc est la fonction d'erreur complémentaire et N_0 la densité spectrale de puissance du bruit. Le paramètre $P_r(q)$ peut être déterminé en pratique en se basant sur l'historique des valeurs du BER et mis à jour selon les informations collectées sur ce même BER. D'autre part, nous avons [2] :

$$P_r(q) \leq \alpha_{k,n} * P_{max}, \tag{2.5}$$

où $\alpha_{k,n}$ est l'atténuation subie par le mobile k sur la sous-porteuse n et P_{max} est la puissance de transmission maximale. Considérons maintenant le paramètre α_k qui modélise l'atténuation en espace libre (pathsloss) et le paramètre $\alpha^2_{k,n}$ qui modélise l'atténuation liée aux multi-trajets, le gain du canal de propagation est donné par :

$$\alpha_{k,n} = \alpha_k * \alpha^2_{k,n}, \tag{2.6}$$

On note par α_{ref} l'atténuation de propagation pour une distance de référence noté d_{ref}. Soit la sous-porteuse n, pour un environnement urbain, un mobile k se situant à une distance d_k de la BS possède une atténuation en espace libre α_k égale à :

$$\alpha_k = \alpha_{ref} \times (\frac{d_{ref}}{d_k})^{3.5}, \tag{2.7}$$

Ainsi, le nombre de bits maximum $q_{k,n}$ pouvant être transmis au mobile k sur une sous-

porteuse n et pendant un intervalle de temps tout en respectant le taux d'erreur binaire cible est donné par :

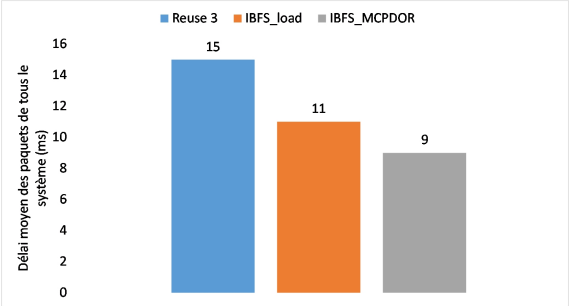
$$q_{k,n} \leq \lfloor \log_2(1 + \frac{3P_{max} * T_s * \alpha_k * \alpha_{k,n}^2}{2N_0[erfc^{-1}(\frac{BER_{target}}{2})]^2}) \rfloor, \tag{2.8}$$

Nous devons mentionner que la valeur α_k ne dépend que de la distance séparant l'utilisateur et la BS et non de la sous-porteuse considérée. Le paramètre $\alpha_{k,n}^2$ modélise l'affaiblissement multi-trajets subit par le signal du mobile k sur la sous-porteuse n. Ce dernier est invariable pendant toute la durée d'un intervalle de temps TTI. Pour nos simulations, nous avons modélisé les valeurs de $\alpha_{k,n}$ par une loi de Rayleigh avec une espérance égale à 1 conformément aux travaux issus de la littérature [2]. En pratique, les valeurs des paramètres α_k et de $\alpha_{k,n}^2$ sont extrapolées à partir des CSIs.

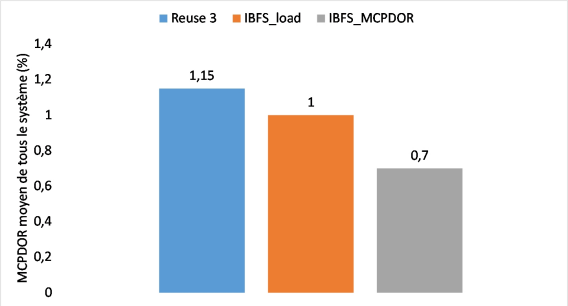
Table 2.2 – Paramètres de la simulation.

Pramètres	**Valeurs**
Nombre de cellules	7
Nombre de RUs par sous-trame	640 RUs
Nombre de sous porteuses	128
Nombre d'intervalles de temps TTI	5
Ordonnanceur inter-cellulaire	MaxSNR
Distance de référence	10 m
Nombre d'utilisateurs	56 (8 par cellule)
Bande passante minimale W_{min}	5*96 (75% du nombre d'URs disponible)
Seuil de tolérence des retards T_k	100 ms
PDOR_{target}	5 %
Exposent du Path-loss	3.5
Multipath fading	Rayleigh fading
Densité thermique du bruit (N_0)	-174 dBm/Hz
$Q_{transfert}$	3 sous-porteuses
BER_{target}	10^{-3}

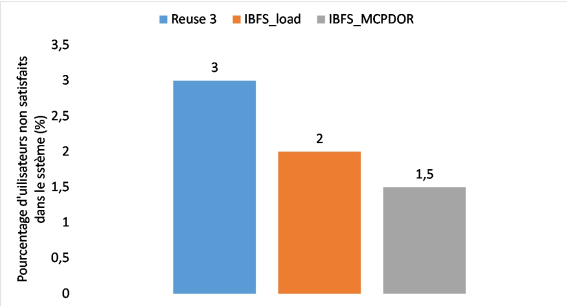
Comme la modulation d'amplitude en quadrature MAQ possède des ordres limités, q appartient à un ensemble S fini égale à $\{0, 2, 4, 6, ..., q_{max}\}$. Pendant un intervalle de temps TTI donné, le nombre maximal de bits $m_{k,n}$ qui pourraient être réellement transmis sur une sous-porteuse n



(a) Délai moyen des paquets dans tout le système.



(b) Mean Cell Packet delay Outage (MCPDOR).



(c) Pourcentage d'utilisateurs insatisfaits dans tout le système.

FIGURE 2.4 – Résultats de simulation du premier scénario

si cette unité de ressource a été allouée au mobile k [2] :

$$m_{k,n} = max\{q \in S, q \neq q_{k,n}\}, \tag{2.9}$$

D'autre part, la puissance de transmission maximale de la BS satisfait cette équation :

$$10\log_{10}(\frac{P_{max}T_s}{N_0} \times \alpha_{ref}) = 31dB. \tag{2.10}$$

Enfin, le taux d'erreur binaire cible (BER_{target}) est fixé à 10^{-3}. Vu ce paramétrage, un mobile qui se situe à la distance de référence d_{ref} avec une valeur moyenne de $\alpha_{k,n}$ égale à l'unité possède un $m_{k,n}$ égale à 6 bits. Le reste des paramètres de simulation sont donnés par le tableau 2.2.

2.3.3.2 Premier Scénario : cellules avec des utilisateurs ayant des profils différents

Dans les réseaux sans fils de nouvelle génération, les cellules peuvent avoir des utilisateurs avec différents profils. Donc, pour ce scénario nous assignons à la cellule 1 des utilisateurs ayant un débit très variable tandis que les autres cellules ont un trafic moins variable (cellule numéro

2 à 7). De plus, la charge de trafic pour ces cellules est plus grande de 15% de celle de la cellule 1. Dans ce contexte, se baser sur la charge pour déterminer quelle cellule doit être aidée nous conduirait à prélever des unités de ressources de la cellule numéro 1 aux profits des cellules 2 à 7. Or, même avec une charge globale de trafic moins importante que les autres, la cellule numéro 1 va avoir les plus de difficultés à satisfaire les besoins de ses utilisateurs puisque de grandes rafales de débit peuvent apparaître dues à la nature plus élastique du trafic. Par conséquent, cela engendre de très grands pics de délais ainsi qu'un grand pourcentage d'utilisateurs insatisfaits.

Dans ce contexte, la technique de réutilisation des fréquences reuse-3 donne une valeur de MCPDOR égale à 9% au niveau de la cellule numéro 1 tandis que les autres cellules ont des valeurs de MCPDOR presque nulles. Cela conduit à un très grand pourcentage de mobiles insatisfaits au sein de la cellule 1. Ces mauvais résultats sont dus au fait que la technique d'allocation statique du spectre (la reuse-3) ne peut jamais aider les cellules en difficultés. Ainsi, la reuse 3 donne les résultats les plus mauvais en termes de temps d'attente moyen des paquets dans les files d'attentes (Fig. 2.4(a)), de MCPDOR (Fig. 2.4(b)) et enfin elle présente le plus grand pourcentage d'utilisateurs insatisfaits pour tout le système (Fig. 2.4(c)).

$IBFS_{load}$ permet relativement de résoudre ce problème. Il prend de la bande passante des cellules ayant la plus grande charge de trafic pour la donner à celles qui ont la plus petite dans le but d'améliorer la QoS de ses utilisateurs. Cependant, la technique $IBFS_{load}$ peut prendre parfois de mauvaises décisions. La cellule sélectionnée pour recevoir plus de bande (cellule qui a la plus grande charge de trafic) peut ne pas représenter la cellule qui a le plus de difficulté. Il se pourrait que les mobiles de cette dernière ne soient pas ceux qui aient les plus pires conditions radios ou aussi, leur flux pourraient ne pas avoir les contraintes les plus strictes à satisfaire ou aucune difficulté à les faire respecter. En se basant sur le MCPDOR, avec l'$IBFS_{MCPDOR}$, la sélection est plus précise. Par conséquent, les performances de cette dernière sont meilleures que l'$IBFS_{load}$ et aussi, elles dépassent largement le modèle reuse 3 (Fig. 2.4(c)).

2.3.3.3 Deuxième scénario : cellules surchargées

Dans ce scénario, nous allons comparer les performances de notre technique d'allocation du spectre l'IBFS avec les performances de la technique reuse-3 et ce dans un scénario où nous avons un évènement spécial qui se déroule telle qu'un match de football ou une manifestation, etc. Nous avons considéré une surcharge d'utilisateurs dans une cellule donnée (Fig. 2.5). On suppose que ces mobiles restent pendant une certaine période dans cette cellule (cellule numéro 1) puis ils se déplacent vers la cellule à côté (cellule numéro 2) pour y revenir après une autre période. Les cellules 3, 4, 5, 6 et 7 ont une charge de trafic normal ainsi que le même débit global durant toute la simulation (Fig. 2.6(c)).

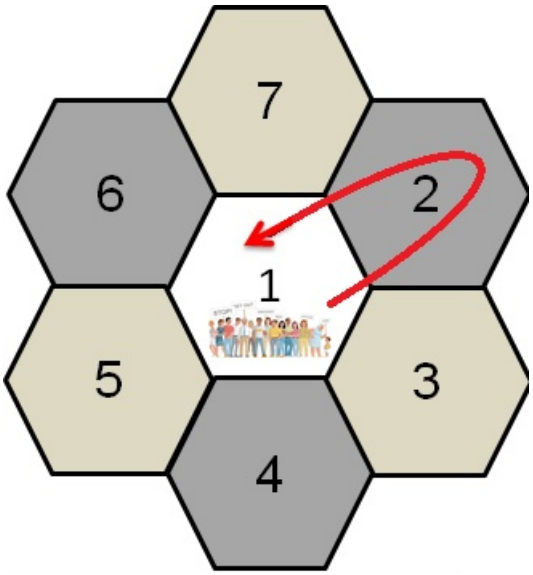
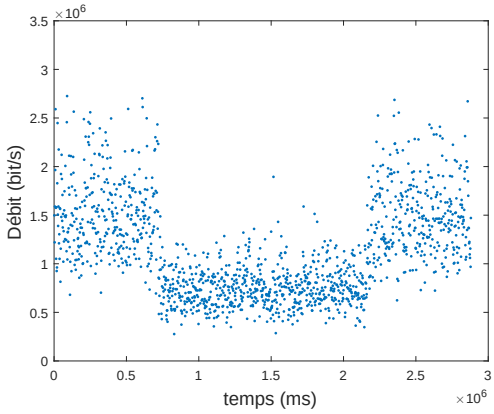


FIGURE 2.5 – Scénario d'évaluation de performance.

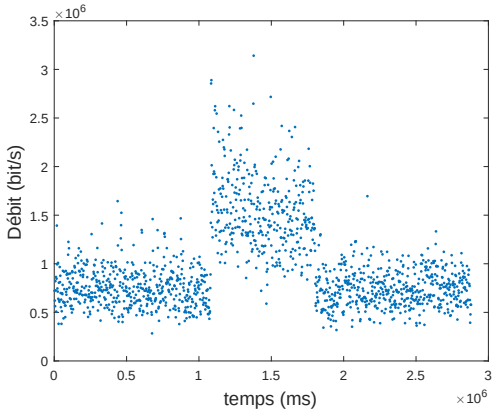
Les figures 2.6(a) et 2.6(b) représentent la charge du trafic en fonction du temps respectivement pour les cellules 1 et 2. La figure 2.6(c) représente l'évolution de la charge de trafic en fonction du temps pour le reste des cellules du système qui possèdent les mêmes valeurs durant tout le temps de simulation. D'après ces figures, le déplacement des utilisateurs est caractérisé par le déplacement de la charge de la cellule 1 à la cellule 2 puis à la cellule 1.

Durant la première période, la cellule numéro 1 éprouve de grandes difficultés pour garantir une bonne QoS et QoE à ses utilisateurs vue la haute charge de trafic. La figure 2.7 représente la valeur moyenne de la bande passante utilisée selon les trois solutions en fonction du temps. La solution reuse 3 ne fournit aucune aide à la cellule surchargée. Par conséquent, avec la technique reuse-3, la cellule 1 utilise une grande partie de sa bande passante (Fig. 2.7(a)) et parfois elle se retrouve dans des situations où elle a un manque de ressources fréquentielles pour la gestion des pics de trafics de ses utilisateurs. Cela engendre naturellement des pics de délais comme le montre la figure 2.8(a). Par contre, la solution IBFS aide les cellules en difficultés. $IBFS_{load}$ prend de la bande passante des cellules qui ont de faible quantité de données à transmettre pour la donner à ceux qui ont une plus forte charge.

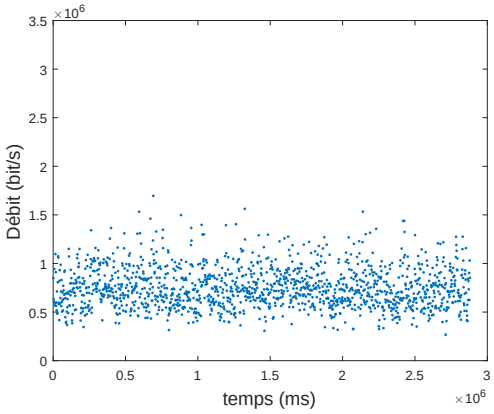
L'$IBFS_{MCPDOR}$ applique le même principe en sélectionnant la cellule possèdant le plus grand nombre de paquets qui arrivent hors délais. Cela a pour conséquence de lui donner plus de ressources fréquentielles de la part des cellules qui ne sont pas en difficultés. Ainsi, une quantité plus importante de bande passante sera disponible pour la cellule numéro 1 quand elle est en surcharge lui octroyant une plus grande capacité à absorber les pics de trafics (Fig. 2.7(a)). Ainsi, les solutions $IBFS_{load}$ et $IBFS_{MCPDOR}$ arrivent à diminuer largement les pics de délais



(a) Charge de trafic de la cellule 1.



(b) Charge de trafic de la cellule 2

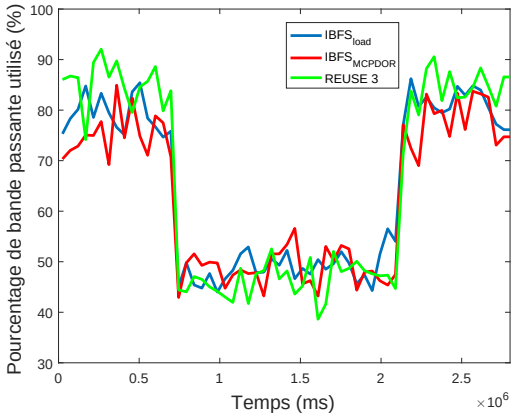


(c) Charge de trafic des cellules 3, 4, 5, 6, 7.

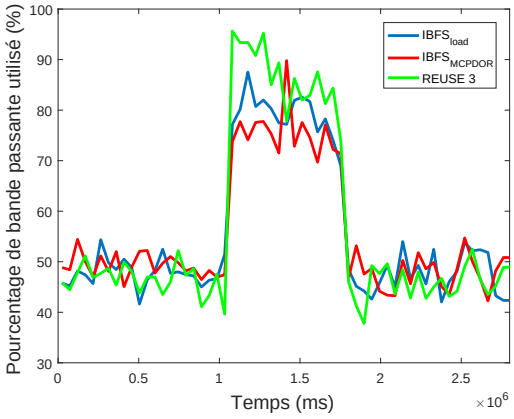
FIGURE 2.6 – Charge de trafic des cellules du système.

(Fig. 2.9(a), 2.10(a)) avec respectivement un retard moyen de paquets au sein du système égal à 23ms et 22.75ms, tandis que la technique reuse-3 donne un délai de 67.25ms.

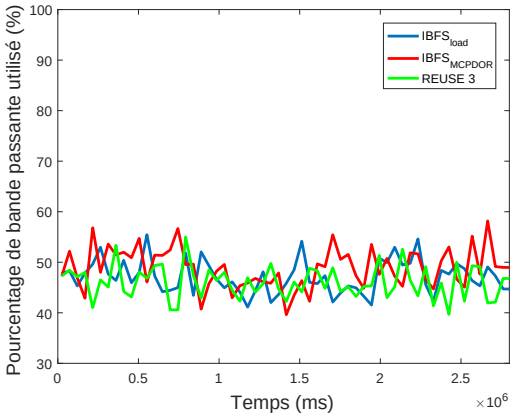
La figure 2.11 représente des résultats globaux pour la cellule 1 et 2 qui présentent des périodes de surcharges de trafics et pour les autres cellules représentées par la cellule 4. La technique frequency reuse-3 ne permet pas d'atteindre un haut niveau de QoE. Un pourcentage de 24% des paquets de la cellule 1 se voient leurs contraintes de QoS non satisfaites (Fig. 2.11(a)) et cela conduit à 37% d'utilisateurs insatisfaits (Fig. 2.11(b)). Cette tendance est la même pour la cellule 2 qui a une plus courte période de congestion. Par contre, nous pouvons noter que la cellule numéro 4 (ce qui représente toutes les autres cellules qui n'ont pas de période de congestion) arrive facilement à satisfaire une bonne QoE pour ses utilisateurs vu que leur bande passante disponible est sous-utilisée. Cette sur-allocation de bande passante pour la cellule qui ne connaît pas de difficultés à assurer une bonne QoE constitue un gâchis significatif. En ef-



(a) Pourcentage de bande utilisé de la cellule 1.



(b) Pourcentage de bande utilisé de la cellule 2.

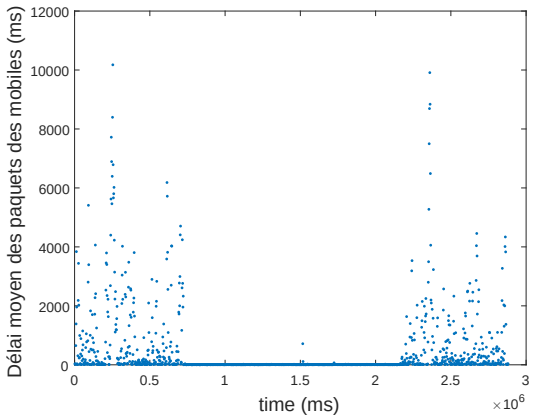


(c) Pourcentage de bande utilisé des cellules 3, 4, 5, 6, 7.

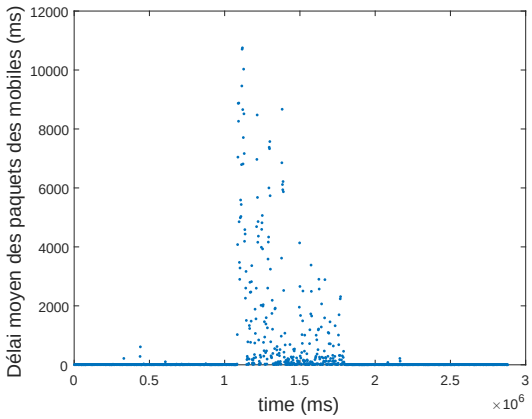
FIGURE 2.7 – Comparaison en termes de bande passante utiliée de REUSE3 et IBFS.

fet, elle pourrait être allouée aux cellules en difficultés dans le but d'augmenter la QoE des utilisateurs au sein du système.

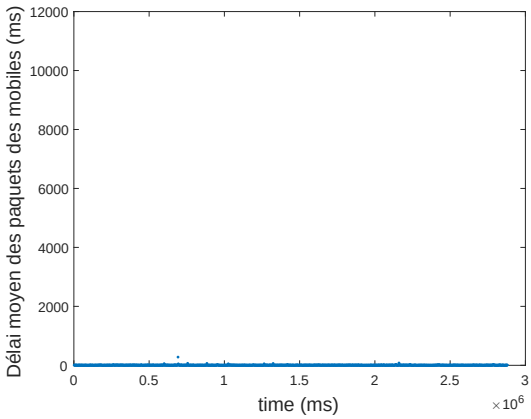
La technique IBFS adapte équitablement le partage de la bande passante disponible entre les cellules qui requièrent plus de ressources fréquentielles. Cet ordonnanceur intercellulaire permet largement de diminuer le pourcentage de paquets qui arrivent hors délais durant les périodes de surcharge (Fig. 2.11(a)). Un autre avantage de la technique IBFS est de diviser le pourcentage d'utilisateur insatisfait d'un facteur plus grand que deux et ce tout en ne pénalisant pas les cellules donneuses (Fig. 2.11(b)). D'autre part, nous pouvons dire que malgré les bonnes performances de la technique $IBFS_{load}$, elles ne dépassent pas celles de la technique $IBFS_{MCPDOR}$. Cela montre qu'une haute charge de trafic constitue une bonne indication pour détecter la cellule qui nécessite d'être aidée mais loin d'être optimale surtout dans le contexte



(a) Délai moyen de la cellule 1.



(b) Délai moyen de la cellule 2.



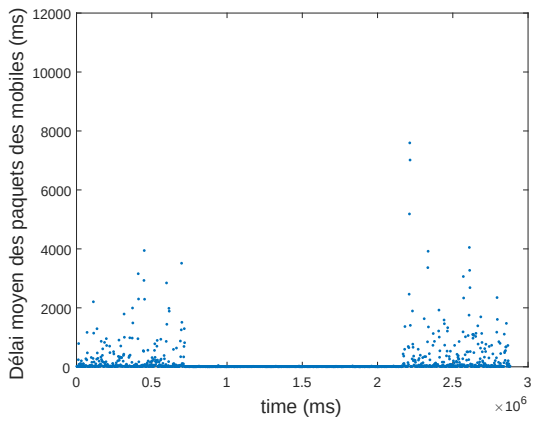
(c) Délai moyen des cellules 3, 4, 5, 6, 7.

FIGURE 2.8 – Délai moyen du système selon REUSE3.

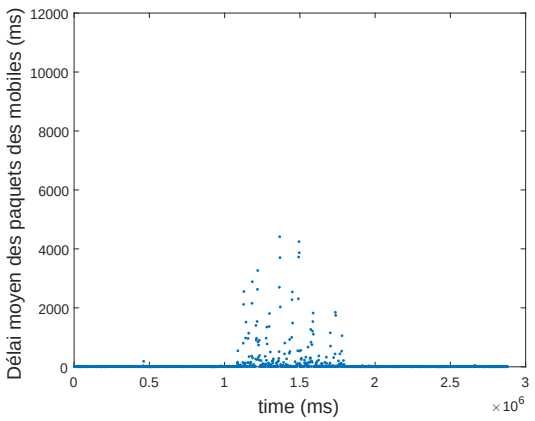
des réseaux sans fils. En effet, les contraintes en termes de délais, de jigue et de taux d'erreur binaire doivent être prises en compte. Le MCPDOR vérifie implicitement si ces paramètres sont respectés ou non et c'est pour cette raison que nous pensons qu'il constitue le meilleur indicateur pour le processus d'allocation dynamique des ressources fréquentielles. Nous allons renforcer cette conclusion avec les résultats du prochain scénario.

2.3.3.4 Troisième scénario : cellules avec différentes conditions de transmission radio

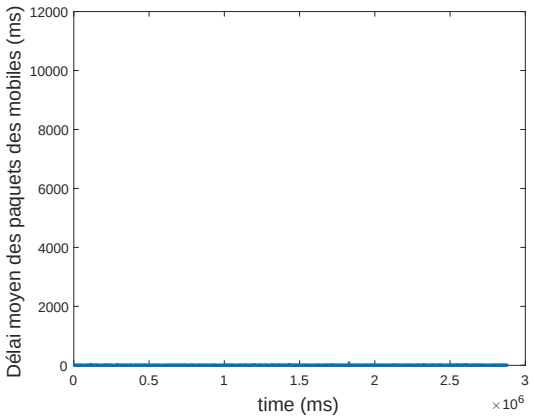
Dans ce scénario, nous considérons que toutes les cellules ont une même charge de trafic avec une moyenne de huit utilisateurs actifs par cellules. Cependant, nous supposons que les mobiles de la cellule 1 possèdent les plus mauvaises conditions de transmission radio par rapport au reste des utilisateurs. Cela est peut-être dû à un environnement plus urbain/dense pour cette



(a) Délai moyen de la cellule 1.



(b) Délai moyen de la cellule 2.

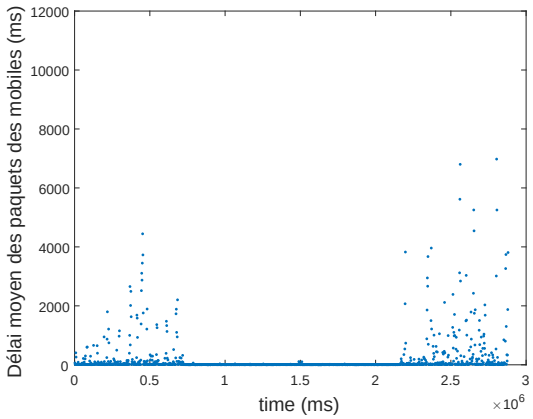


(c) Mean delay of cell 3, 4, 5, 6, 7.

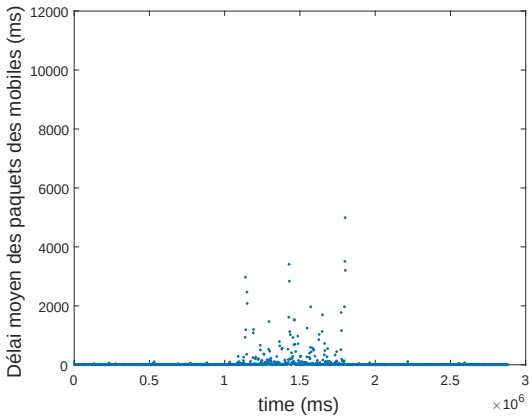
FIGURE 2.9 – Délai moyen du système selonh $IBFS_{load}$.

cellule ce qui accroît les effets négatifs du pathloss et du shadowing. Par conséquent, nous nous attendons à ce que les utilisateurs de la cellule 1 soient plus insatisfaits que dans le reste des cellules.

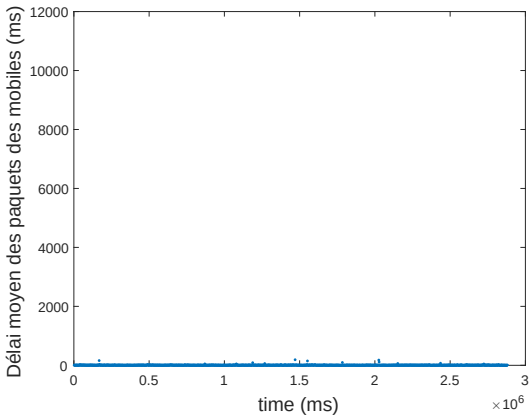
La figure 2.12 montre les résultats concernant l'insatisfaction des utilisateurs : dans la cellule 1 qui présente des utilisateurs ayant les pires conditions radios (Fig. 2.12(a)), dans toutes les autres cellules (Fig. 2.12(b)) et en moyenne dans tout le système. Puisque toutes les cellules ont la même quantité de bande passante avec reuse 3, nous remarquons qu'avec cette technique les utilisateurs de la cellule 1 (qui se situent dans une zone extrêmement urbanisée) sont très pénalisés avec une insatisfaction de 19.5% contre 0.09% dans toutes les autres cellules. Cependant, l'$IBFS_{MCPDOR}$ arrive bien à aider les uilisateurs de la cellule 1. En fait, à cause de leurs mauvaises conditions radios, leur PDOR augmente rapidement et donc, le MCPDOR de



(a) Délai moyen de la cellule 1.



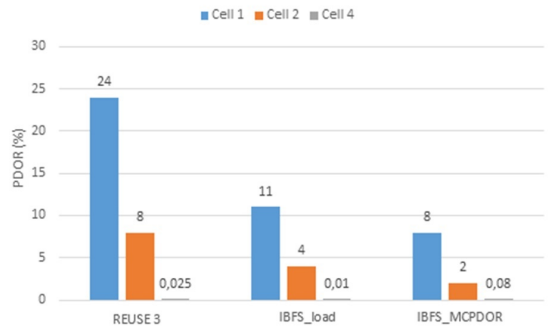
(b) Délai moyen de la cellule 2.



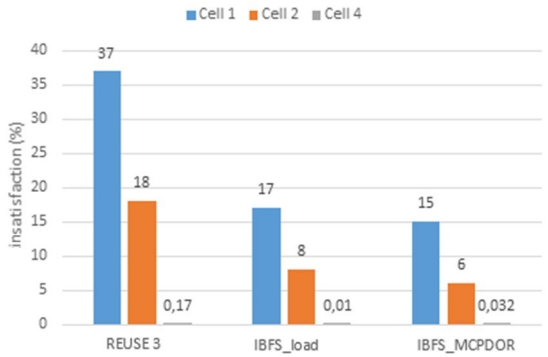
(c) Mean delay of cell 3, 4, 5, 6, 7.

FIGURE 2.10 – Délai moyen du système selon $IBFS_{MCPDOR}$.

la cellule 1 augmente et devient le plus élevé dans le réseau. Ainsi, grâce à ce dernier paramètre, l'$IBFS_{MCPDOR}$ détecte précisément que la cellule 1 a besoin de plus de bande que les autres et ce même si toutes les cellules ont la même charge de trafic globale. Par conséquent, nous obtenons un ratio d'insatisfaction égale à 7.12% pour les utilisateurs de la cellule 1 (l'insatisfaction est divisée par 2.74 en la comparant à la reuse 3). Toutefois, l'insatisfaction des utilisateurs des autres cellules reste au-dessus de 1% (plus précisément, égale à 0.4% ce qui peut être considéré comme négligeable). Enfin, en se focalisant sur les résultats globaux de la figure 2.12, l'insatisfaction globale des utilisateurs est considérablement réduite. Enfin, l'$IBFS_{load}$ donne de plus mauvais résultats que le reuse 3 (Fig. 2.12) puisque dans ce contexte, il se base sur une métrique non appropriée.

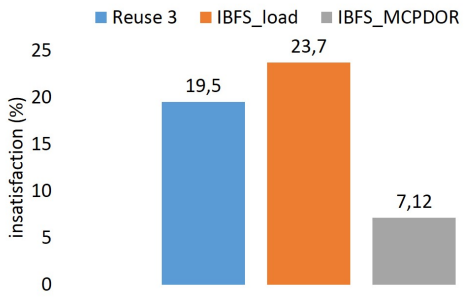


(a) PDOR moyen des utilisateurs dans le système.

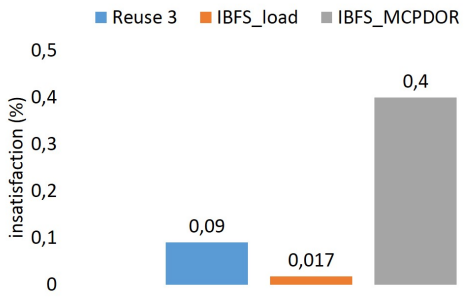


(b) Pourcentage d'utilisateur insatisfait dans le système - $PDOR_{target}$ = 5 %.

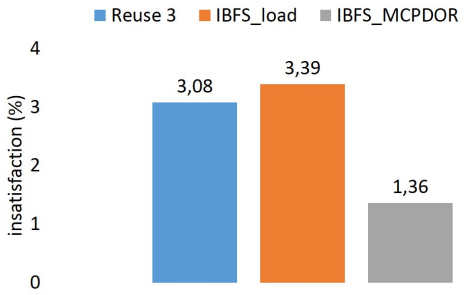
FIGURE 2.11 – Analyse du respect des contraintes QoS.



(a) Insatisfaction moyenne des utilisateurs dans la cellule 1



(b) Insatisfaction moyenne des utilisateurs dans les cellules 2, 3, 4, 5, 6, 7.



(c) Insatisfaction moyenne des utilisateurs dans le système.

FIGURE 2.12 – Comparaison de l'insatisfaction des utilisateurs pour $REUSE$ 3, $IBFS_{load}$ et $IBFS_{MCPDOR}$.

2.4 Le Dynamic Inter-cellular Bandwidth Fair Sharing Scheduler (DIBFS)

2.4.1 Limites de l'IBFS

Dans la dernière section, nous avons introduit un ordonnanceur intercellulaire basé sur une stratégie d'allocation dynamique de la bande dans le but d'augmenter la QoS du réseau cellulaire. Notre solution (IBFS) consiste à transférer les ressources fréquentielles des cellules en sous charge vers les cellules en difficultés. Nous avons aussi introduit un nouveau paramètre de QoS qui indique d'une manière plus fiable la cellule qui a besoin de plus de ressources radios dans le réseau. Cette métrique est liée au délai puisqu'elle mesure le ratio de paquets arrivés après un certain seuil spécifique à chaque mobile. Quand une cellule est sélectionnée pour prêter une partie de sa bande à une de ses cellules voisines en surcharge, l'algorithme IBFS doit s'assurer que la cellule donneuse a en sa possession une quantité de ressources fréquentielles suffisantes pour satisfaire ses propres utilisateurs. Dans ce contexte, la bande de chaque cellule est divisée en deux sous-bandes : la première partie est constituée de ressources radios qui doivent rester en la possession de la cellule donneuse afin qu'elle puisse toujours servir les besoins de ses utilisateurs. Ainsi, cette quantité de bande doit être seulement allouée à la cellule considérée et nous la notons par la suite par W_{min}. La seconde sous-bande constitue la quantité de ressources disponibles pour le processus d'allocation dynamique du spectre.

Dans cette partie, nous évoquons le concept de la bande passante minimale fondamentale pour les algorithmes d'ordonnancement multicellulaire qui, selon nos connaissances, n'a jamais été discuté dans la littérature. Dans ce contexte, nous confortons l'hypothèse que plus une cellule est chargée, plus sa bande passante minimale doit être large afin de la protéger contre les hauts pics de trafic soudains et irréguliers. En effet, si nous considérons une cellule qui arrive aisément à fournir une bonne QoS à ses utilisateurs actifs, l'algorithme IBFS va transférer une partie de ses ressources fréquentielles à ses cellules voisines en difficultés. Si la bande passante minimale de cette cellule est mal ajustée, l'IBFS va lui laisser une petite partie de ressources radios ce qui a pour effet la dégradation de la QoS de ses propres utilisateurs. Dans ce contexte, nous démontrons que, pour un réseau cellulaire employant une technique d'allocation dynamique du spectre comme l'IBFS et pour différents profils de charge de trafic, les performances du système dépendent fortement de la valeur de ce seuil W_{min}. Plus précisément, quand les cellules sont en sous-charge, les plus faibles valeurs de W_{min} atteignent les meilleurs résultats, tandis que les plus grandes valeurs de ce dernier paramètre offrent les meilleures performances à haute charge de trafic. Que se soit pour notre algorithme IBFS ou pour le reste des travaux de l'état de l'art, la bande passante minimale de chaque cellule a été considérée comme un para-

mètre statique ne prenant pas en considération le profil de la charge de trafic de la cellule. Dans cette partie, nous introduisons un nouvel ordonnanceur multicellulaire nommée *Dynamic Intercellular Bandwidth Fair Sharing* (DIBFS). Cette nouvelle solution consiste à allouer/ré-allouer les ressources radios entre les cellules en se basant sur le concept de bande passante minimale. Ce dernièr paramètre est calculé dynamiquement pour chaque cellule en fonction du contexte, en particulier du ratio de bande utilisée ainsi qu'en fonction de la quantité de bande qu'elle possède instantanément.

2.4.2 Description du DIBFS

TABLE 2.3 – Liste des symboles.

Symbole	Définition
A	Groupe de sous-porteuses de la cellule 1
B	Groupe de sous-porteuses de la Cellule 2, Cellule 4 et Cellule 6
C	Groupe de sous-porteuses de la Cellule 3, Cellule 5 et Cellule 7
c, i, k, z	Indices de cellules d'un groupe spécifique
d_G	Cellule leader donneuse du groupe G
G	Groupe de sous-porteuses (A, B ou C)
$group(i)$	Fonction qui retourne de le groupe de sous-porteuses de la Cellule i, e.g. group(1) = A
g_{max}	Nombre maximum de groupe
r	Cellule sélectionnée pour recevoir de l'aide de la cellule donneuse (i.e. cellule receveuse)
S	Groupe de sous-porteuses de la Cellule 3, Cellule 5 et Cellule 7
SFB	L'ensemble des sous-porteuses : $SFB = \{A,\ B,\ C\}$
$SNC(i, group(k))$	L'ensemble des cellules qui sont les plus proches voisins à la cellule i et ayant le même groupe de sous-porteuses que la cellule k
$W(i)$	Nombre total de sous-porteuse de la cellule i
$W_{group(i)}(k)$	Nombre de sous-porteuses, initialement dans le groupe $group(i)$ de la cellule i, et possédés actuellement par la cellule k
$W_G(k)$	Nombre de sous-porteuses, initialement dans le groupe G, et possédés actuellement par la cellule k
$W_{av}(i)$	Nombre de sous-porteuses de la cellule i disponible pour l'emprunt ou pour la restitution (Fig. 2.13(b)).
$W_{min}(i)$	Nombre minimale (nominale) de sous-porteuses que la cellule i a besoin dans le but de garder ses utilisateurs connectés (comme c'est montré par la zone hachurée de la figure 2.13(b))

L'allocation des ressources radios est effectuée en employant deux ordonnanceurs opérant sur deux échelles de temps différentes. Le premier est notre solution DIBFS, elle fonctionne sur une échelle de temps plus longue et décide de la manière avec laquelle la bande passante doit être allouée à chaque cellule tout en prenant en considération les différents paramètres QoS. Dans ce sens, le DIBFS agit comme un coordinateur central en collectant les messages de signalisation de ses cellules associées afin de leur allouer/réallouer les sous-porteuses disponibles à chaque instant d'ordonnancement. Le second ordonnanceur est situé au niveau de la couche MAC de station de base et opère sur une échelle de temps plus fine. Il consiste à assigner les ressources radios aux utilisateurs en se basant sur l'allocation globale de la bande fournie par l'algorithme DIBFS. Comme pour la solution IBFS, n'importe quel ordonnanceur monocellulaire peut être compatible avec notre nouvelle solution. Enfin, l'algorithme DIBFS est proposé pour le modèle de réutilisation de fréquences reuse 3 ainsi que pour le Fractional Frequency reuse (FFR) comme nous le verrons plus tard.

2.4.2.1 La notion de bande passante minimale

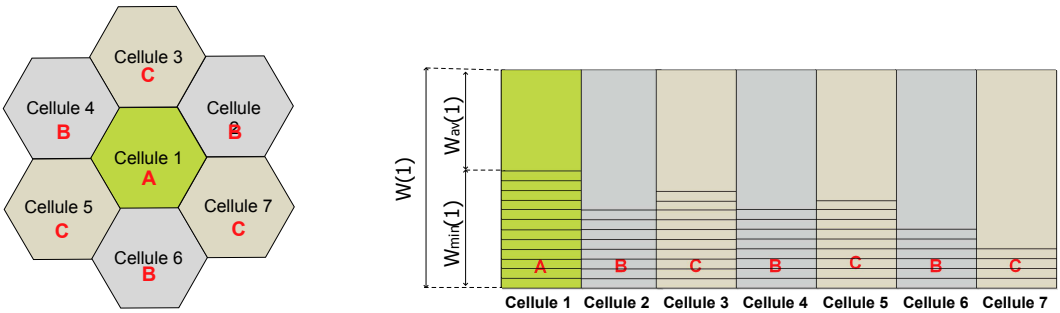
Considérons un cluster constitué de sept cellules où trois groupes de sous-porteuses sont utilisées (modèle reuse 3) appelés A, B et C (figure 2.13(a)). Le groupe A est affecté à la cellule 1. Le groupe B est associé aux cellules 2, 4 et 6. Enfin, le groupe C contient les ressources radios affectées aux cellules 3, 5 et 7. Avant le processus d'ordonnancement multicellulaire, nous supposons que les ressources fréquentielles sont uniformément réparties entre les trois groupes (Fig. 2.13(b)). En plus, la bande passante de chaque cellule est divisée en deux sous-bandes : la première contient l'ensemble des sous-porteuses disponibles pour être empruntées (ou restituées) tandis que la seconde contient le reste des ressources disponibles uniquement afin d'être utilisée localement par la cellule considérée (la bande passante minimale qu'une cellule ne peut céder à ses cellules voisines). La quantité minimale de sous-porteuses $W_{min}(i)$ de la cellule i et le nombre total de ses sous-porteuses $W(i)$ sont calculés selon ces deux équations :

$$W_{min}(i) = W(i) \times RW_{used}(i), \tag{2.11}$$

$$W(i) = W_{av}(i) + W_{min}(i), \tag{2.12}$$

avec $RW_{used}(i)$ le ratio de bande passante utilisée par la cellule i. Nous définissons cette quantité par le nombre de sous-porteuse allouée par une cellule à ses propres utilisateurs divisé par le nombre total de sous-porteuses. Toutes ces informations sont calculées localement par l'ordonnanceur de la couche MAC de chaque BS afin de servir comme paramètre d'entrée à l'ordonnanceur DIBFS. L'algorithme multicellulaire calcule le nombre minimal de sous-porteuses

$W_{min}(i)$ en se basant sur 2.11 et rafraîchit la nouvelle valeur de $W_{av}(i)$. Ce dernier représente le nombre de sous-porteuses disponibles pour être transféré aux cellules voisines en difficultés.



(a) Allocation initiale des sous-porteuses dans le cluster.

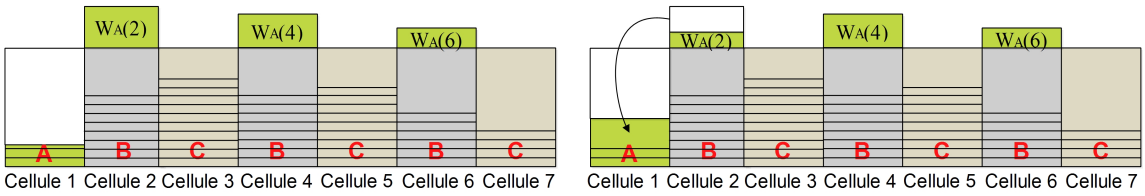
(b) Répartition initiale des sous-porteuses en tre les cellules.

FIGURE 2.13 – Modélisation du système.

À chaque instant d'ordonnancement, une quantité fixe de bande égale à $Q_{transfert}$ doit être réallouer de la part de la cellule donneuse (cellule d) à la cellule receveuse (Cellule r). Si $Q_{transfert}$ est plus grand que la quantité de sous-porteuses disponibles $W_{av}(d)$ de la cellule donneuse, $Q_{transfert}$ sera égale à $W_{av}(d)$. Sinon, si $Q_{transfert}$ est plus petit que $W_{av}(d)$, aucun changement ne sera fait et $Q_{transfert}$ garde sa valeur. Cette vérification est nécessaire dans le but de prévenir l'ordonnanceur intercellulaire d'emprunter des sous-porteuses qui appartiennent à la bande minimale (nominale) de la cellule donneuse. Le paramètre $Q_{transfert}$ prend des valeurs statiques que nous fixons dans la configuration du scénario de simulation. Nous avons validé cette hypothèse à travers une étude basée sur la simulation qui considère des scénarios contenant un large panel de valeurs de $Q_{transfert}$. Nous avons observé que ce paramètre a une influence négligeable sur les performances du système. En effet, la quantité de bande à transférer est toujours liée à la bande minimale des cellules ajustée dynamiquement.

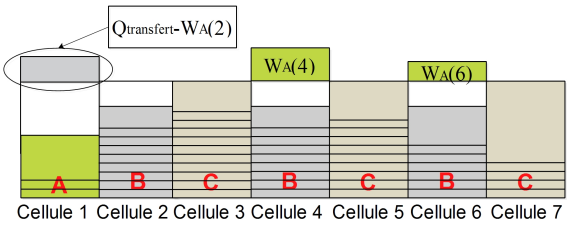
2.4.2.2 Description générale de l'algorithme DIBFS

Une description générale de l'algorithme DIBFS est donnée par l'algorithme 1 et la définition de chaque paramètre utilisés est illustrée par le tableau 2.3. Dans ce qui suit, nous décrivons le processus d'ordonnancement du DIBFS avec un exemple détaillé. Supposons qu'à un instant donné, la cellule 1 représente la cellule qui a besoin d'aide (celle qui a le plus grand niveau de MCPDOR). Ainsi, à partir de chaque groupe de sous-porteuses auquel les cellules voisines appartiennent (dans ce cas les groupes B et C), une cellule donneuse est sélectionnée selon deux cas de figures :



(a) Répartition des sous-porteuses avant le processus d'ordonnancement.

(b) Restitution des sous-porteuses du groupe B au groupe A.



(c) Processus de restitution et de l'emprunt des sous-porteuses.

FIGURE 2.14 – Répartition de la bande entre les cellules.

- Dans le cas où les cellules voisines auraient précédemment reçu une partie de la bande de la cellule 1, le donneur est la cellule qui a la plus grande portion de sous-porteuses du groupe A (le groupe de sous-porteuses associés à la cellule 1) : une cellule donneuse leader est sélectionnée dans le but de restituer la portion de bande qui appartenait à la cellule reçeveuse. Supposons que nous avons une configuration représentée par la figure 2.14(a) où la cellule 2 est la cellule donneuse. Cette cellule a reçu une quantité de bande de la part de la cellule 1 égale à $W_A(2)$ durant les derniers instants d'ordonnancement [3]. Si $Q_{transfert}$ est plus petit que $W_A(2)$, la cellule 2 restitue à la cellule 1 une quantité de bande égale à $Q_{transfert}$ et cette même quantité est supprimée du groupe A affecté à la cellule 2. La nouvelle configuration est représentée par la figure 2.14(b). Aussi, la restitution est faite à partir de la cellule 2 aux cellules dans le même groupe que la cellule 1 et voisines de la cellule 2. Ceci a pour but d'éviter de potentiels futurs verrouillages de fréquences. Cependant, si $Q_{transfert}$ est plus grand que $W_A(2)$, la totalité de cette dernière quantité est restituée et une autre quantité égale à $Q_{transfert} - W_A(2)$ est empruntée de la part du groupe B associé à la cellule 2. Cependant, des interférences co-canal peuvent se produire à cause du fait que le même groupe de sous-porteuses est utilisé par les cellules 4 et 6. Afin d'éviter ce problème, les cellules 4 et 6 sont interdites d'utiliser les sous-porteuses empruntées (les sous-porteuses sont verrouillées). Cette nouvelle configuration est représentée par la figure 2.14(c). Si à l'instant d'ordonnancement suivant, la cellule

3. $W_A(2) = W_{groupe(i)}(k)$, avec $i = 1$ et $groupe(i) = A$.

1 est encore la cellule donneuse qui a besoin de plus de bande tout en ayant la même configuration de la figure 2.14(c), la cellule 4 sera la cellule donneuse et les mêmes étapes décrites précédemment seront suivies.

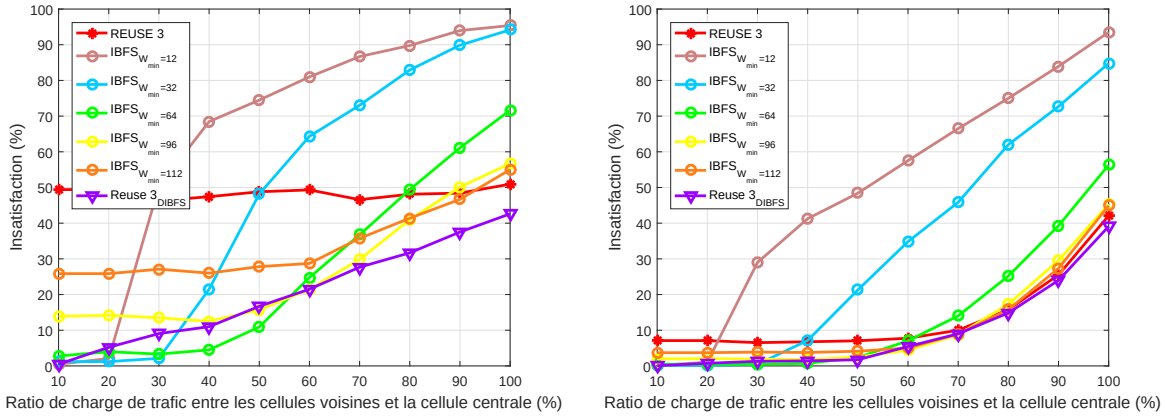
- Dans le cas où aucunes des cellules voisines possèdent une portion du groupe de sous-porteuses de la cellule receveuse (groupe A associé à la cellule 1) (figure 2.13(b)) ou au début du fonctionnement de l'algorithme DIBFS, la cellule donneuse de chaque groupe est la cellule voisine à la cellule 1 dans le cluster considéré et ayant le plus grand MCPDOR. En fait, la cellule qui a le plus grand MCPDOR a aussi souvent la plus grande valeur de W_{min}. Par conséquent, nous avons choisi cette cellule comme donneuse dans le but de la protéger puisque grâce à W_{min}, nous pouvons lui garantir une plus grande quantité de bande que dans le cas où d'autres cellules avec de plus faibles MCPDOR sont choisies. Supposons maintenant que les celules 2 et 3 sont les cellules donneuses associées respectivement aux groupes B et C. Une quantité totale de ressources radios égale à $Q_{transfert}$ vérifiant la condition définie dans la sous-section précédente sera transférée du groupe B de la cellule 2 (et du groupe C de la cellule 3) à la cellule 1. Les sous-porteuses nouvellement allouées sont verrouillées au niveau des cellules 4 e 6 du groupe B (de même que pour les cellules 5 et 7 du groupe C) et ce dans le but d'éviter les interférences intercellulaires.

2.4.3 Évaluation de performances

Nous avons adopté les mêmes configurations de simulation que pour la partie 2.3.3 et qui sont représentées dans le tableau 2.2. Dans ces simulations, nous considérons toujours des utilisateurs utilisant le même type d'application sporadique et produisant de hauts pics de débit avec des contraintes de délais très strictes. Ce type de trafic complique fortement la tâche des ordonnanceurs. En fait, l'étude des performances des stratégies d'allocation de ressources en modélisant des trafics à temps réalistes influe fortement sur les performances du système par comparaison aux autres modèles de trafics non réelles (qui assument que les files d'attente sont toujours pleines).

2.4.3.1 Premier scénario : influence de W_{min} sur les performances du système

Comme pour l'IBFS, notre nouvel algorithme est adapté pour le mode de déploiement reuse-g. Ainsi, nous allons comparer notre solution appelée $Reuse3_{DIBFS}$ à la technique de réutilisation du spectre reuse 3 où 128 sous-porteuses seront utilisées. Dans le but de montrer l'impact de la valeur seuil W_{min} sur les performances du système, l'algorithme d'ordonnancement multicel-



(a) Insatisfaction moyenne des utilisateurs dans la cellule centrale.

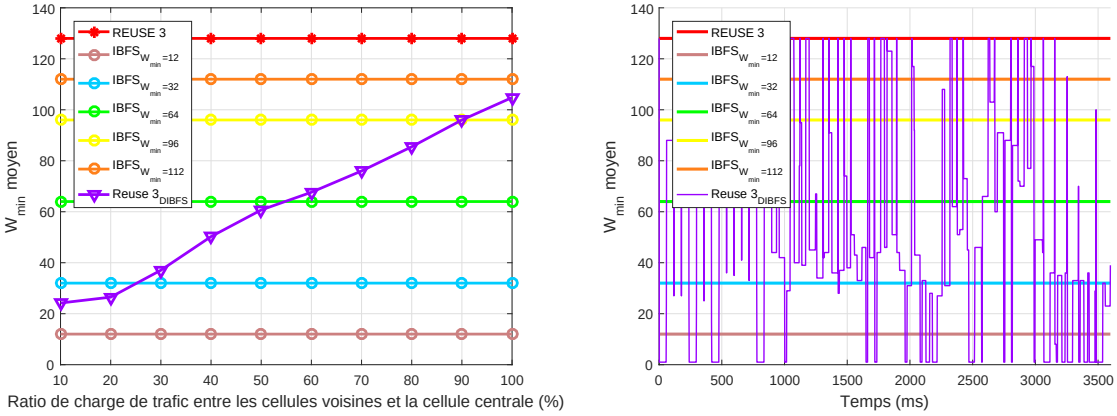
(b) Insatisfaction moyenne des utilisateurs dans tout le système.

FIGURE 2.15 – Résultats de simulation du 1er scénario - PDOR_{target} = 5 %.

lulaire sera aussi comparé à l'ancienne version $IBFS_{MCPDOR}$ tout en considérant cinq valeurs différentes de W_{min} fixes (non adaptée dynamiquement en fonction du contexte). Ces cinq variantes de l'$IBFS_{MCPDOR}$ sont notées par $IBFS_{W_{min}=i}$ avec $i \in \{12, 32, 64, 96, 112\}$.

Dans ce scénario, la cellule 1 possède la plus grande demande en termes de débits par rapport à ses cellules voisines. Dans une première simulation, le ratio de charge de trafic des cellules voisines par rapport à la charge de trafic de la cellule 1 est égale à 10 %. Ensuite, nous augmentons successivement ce ratio de 10 % jusqu'à ce qu'il ateigne 100 %.

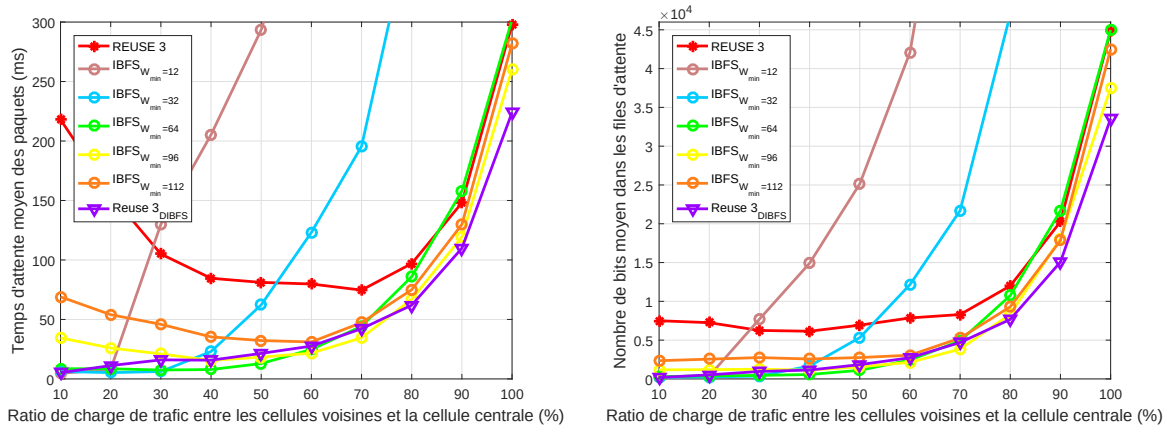
Les figures 2.15(a) et Fig. 2.15(b) montrent le niveau d'insatisfaction des utilisateurs respectivement dans la cellule 1 et globalement, dans tout le système. Nous supposons qu'un utilisateur n'est satisfait que si, à la fin de sa connexion, son PDOR est plus faible qu'une valeur notée PDOR_{target} et fixée dans les paramètres de la simulation. Quand la charge de trafic des cellules voisines est très faible par rapport à la cellule centrale (jusqu'à 25 %), la stratégie IBFS avec toutes les valeurs seuils simulés de W_{min} atteint de meilleures résultats que le modèle reuse 3. À partir de 30 %, la technique IBFS avec une valeur seuil $W_{min} = 12$ donne les pires résultats en termes de taux d'utilisateurs insatisfaits que ce soit pour la cellule centrale ou pour tout le système. De plus, les performances du système sont dégradées puisque le ratio d'utilisateurs insatisfaits est plus important que celui du modèle classique reuse 3. En effet, avec cette faible valeur seuil ($W_{min} = 12$), un grand nombre de sous-porteuses sont disponibles afin d'être dynamiquement ré-alloué et par conséquent, ces dernières seront verrouillées. À cause de cette imprudence, une plus faible quantité de sous-porteuses sera disponible au niveau des cellules voisines et ainsi, la QoS fournie sera dégradée. Nous remarquons aussi que lorsque les charges de trafics augmentent aux seins des cellules voisines, les plus grandes valeurs seuils de W_{min}



(a) Bande passante minimale de la cellule voisine.

(b) Variations temporelles de la bande passante minimale des cellules voisines.

FIGURE 2.16 – Étude de W_{min} des cellules voisines en considérant la charge de trafic et le temps.



(a) Délai moyen des paquets dans le système.

(b) Nombre de bits moyen dans les files d'attente.

FIGURE 2.17 – Délai moyen des utilisateurs de tout le système et occupation moyenne des files d'attente.

offrent les meilleurs résultats. Par exemple, quand le ratio de la charge de trafic des cellules adjacentes est égale à 10 % de celui de la cellule centrale, l'$IBFS_{W_{min}=12}$ surpasse l'$IBFS_{W_{min}=112}$, mais, si ce ratio est plus grand que 30 %, la technique IBFS$_{W_{min}=12}$ atteint les plus pires valeurs. Dans ce cas, l'emploie de la technique IBFS avec une valeur seuil $W_{min} = 12$ n'est pas optimale. Considérons maintenant les cas où le ratio de charge de trafic est plus grande que 80 %. Dans ce contexte, les cellules ont approximativement le même profil de charge de trafic avec les mêmes contraintes de QoS. Nous constatons que le modèle traditionnel reuse 3 offre les meilleurs résultats que tous les autres schémas IBFS (figure. 2.15). En effet, quand les cellules sont soumises à une charge de trafic très lourde en même temps, ré-allouer une quantité faible de sous-porteuses depuis une cellule surchargée à une autre en surcharge est accompagné par un verrouillage de sous-porteuses qui à son tour, dégrade les performances du système.

L'algorithme DIBFS a pour but de trouver un compromis entre la charge de trafic de chaque cellule et ses valeurs seuils W_{min} optimales. Par conséquent, il calcule dynamiquement la bande passante minimale de chaque cellule en fonction du taux d'utilisation de sa bande ainsi que de ses sous-porteuses disponibles. La figure 2.16(a) montre les variations de la valeur seuil W_{min} d'une cellule voisine. Comme nous pouvons de le voir, W_{min} est une fonction du ratio de la charge de trafic de la cellule centrale par rapport aux cellules adjacentes. Notons qu'avec notre algorithme, le seuil moyen W_{min} augmente quand la charge de trafic dans la cellule augmente. En effet, plus une cellule est chargée, plus son ratio de bande utilisée est grand. De plus, nous observons que les valeurs seuils dynamiques W_{min} fournies par l'algorithme DIBFS sont toujours proches des valeurs optimales. Par exemple, quand le ratio de la charge de trafic est égale à 40 %, l'IBFS$_{W_{min}=64}$ atteint les meilleurs résultats (figure 2.15(b)). Dans ce cas, la valeur seuil moyenne W_{min} des sous-porteuses dont les cellules voisines auraient besoin selon le shéma DIBFS est égale à 50 % (figure 2.16(a)). La figure 2.16(b) montre les fluctuations temporelles de W_{min} ajustés dynamiquement d'une manière opportuniste à travers le temps. Grâce à cette adaptation, le DIBFS atteint toujours les meilleurs résultats même quand les cellules voisines sont soumises à des conditions de trafics très lourdes et cela même sur de très court laps de temps (figure. 2.15(b)).

Les figures 2.17(a) et Fig. 2.17(b) montrent respectivement le temps d'attente moyen des paquets et le nombre moyen de bits dans les files d'attente de tous les utilisateurs du système. Comme attendu, quand les valeurs seuils de W_{min} sont mal choisies, le nombre de paquets en attente de transmission augmente dans les files d'attente et les valeurs de délai des paquets explosent. Ainsi, le ratio d'utilisateurs insatisfaits augmente puisque leur contraintes de QoS ne sont pas satisfaites (figure. 2.15(b)). Par contre, la solution DIBFS fournit quel que soit le contexte, un faible temps d'attente des paquets ainsi qu'un faible nombre de bits dans les buffers.

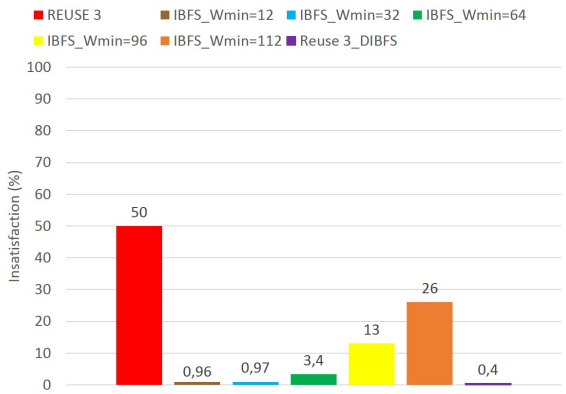
2.4.3.2 Deuxième scénario : évaluation de performances de la solution DIBFS

Dans ce sous scénario, nous supposons que la connexion de chaque utilisateurs est divisée en cycles de cinq minutes. Ces cycles représentent la durée d'une session. Les cellules périphériques sont divisées en deux groupes : le premier est constitué par les cellules qui utilisent les sous-porteuses du groupe B tandis que le second contient les cellules employant les ressources radios du groupe C. Nous supposons que les utilisateurs de chaque groupe de cellules ont la même demande en termes de débit durant chaque session. Par conséquent, la charge de trafic de chaque groupe de cellules représente la demande moyenne de débit de leurs mobiles associés. De plus, nous considérons deux sous-scénarios de simulation avec différents profils de charge de trafic :

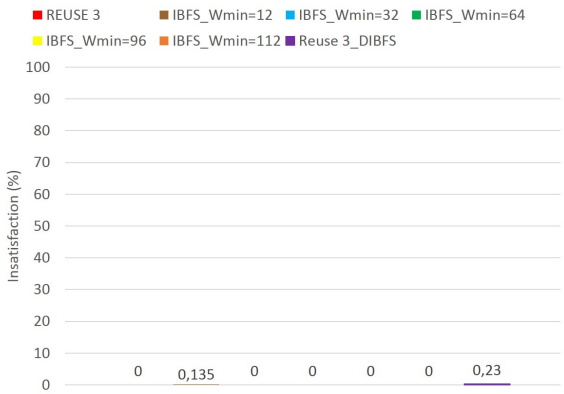
- Sous-scénario A : Durant chaque session, le ratio de charge de trafic des cellules voisines par rapport à la cellule centrale est sélectionné suivant une même probabilité à partir de l'ensemble : {5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 25 %, 30 %, 35 %}. Ce sous-scénario représente des fluctuations faibles aux seins des cellules voisines.

- Sous-scénario B : Nous supposons les mêmes règles que dans le sous scénario A. Cependant, nous assumons que les cellules voisines sont caractérisées par de plus grandes charges de trafics sélectionnées équiprobablement à partir de cet ensemble : {10 %, 20 %, 30 %, 40 %, 50 %, 60 %, 70 %, 80 %, 90 %}. Ce sous-scénario représente une grande fluctuation de la charge aux seins des cellules voisines.

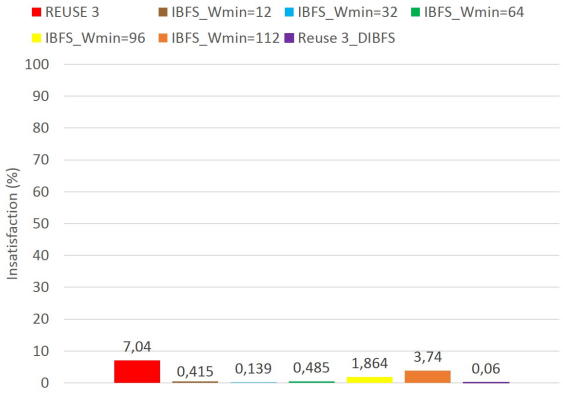
La figure 2.18 représente les résultats de l'insatisfaction moyenne des utilisateurs selon le sous-scénario A. Dans cette figure, nous représentons ces derniers résultats pour la cellule 1 qui a la plus grande charge de trafic (figure 2.18(a)), pour les autres cellules qu'on représente par la cellule 2 (figure 2.18(b)) et en moyenne pour tout le système (figure 2.18(c)). Puisqu'avec la reuse 3, toutes les cellules ont toujours le même nombre de sous-porteuses, nous remarquons qu'avec ce schéma conventionnel, les utilisateurs de la cellule 1 (la cellule surchargée) sont fortement pénalisée avec 50% d'insatisfaction contre 0% au sein des cellules voisines en sous charge.
Le meilleur ratio d'insatisfaction (figure 2.18(a)) selon le schéma IBFS est égale à 0.96 % et correspond à l'$IBFS_{W_{min}=12}$. Grâce à l'adaptation dynamique de la bande passante minimale requise W_{min}, les performances de la solution DIBFS surpassent ceux des autres schémas avec un ratio d'insatisfaction égale à 0.4 %. (l'insatisfaction est divisée par 2.4 en la comparant à l'$IBFS_{W_{min}=12}$ et par 125 par rapport au reuse 3). Aussi, les performances des utilisateurs de la



(a) Insatisfaction moyenne des utilisateurs dans la cellule centrale.

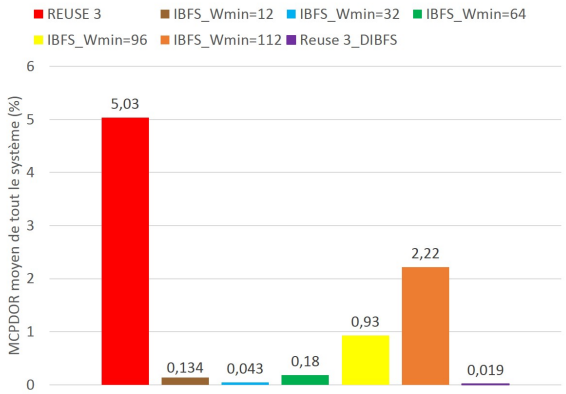


(b) Insatisfaction moyenne des utilisateurs dans les cellules voisines.

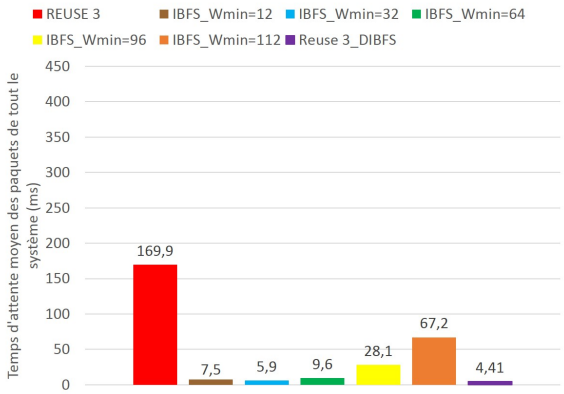


(c) Insatisfaction moyenne des utilisateurs dans tout le système.

FIGURE 2.18 – Résultats de l'insatisfaction du scénario à faible charge de trafic - $PDOR_{target}$ = 5 %.



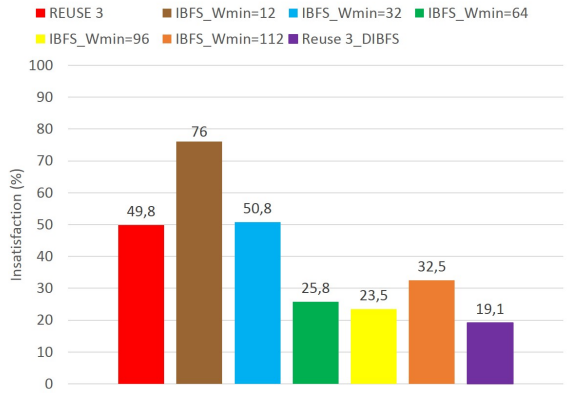
(a) PDOR moyen des utilisateurs dans le système.



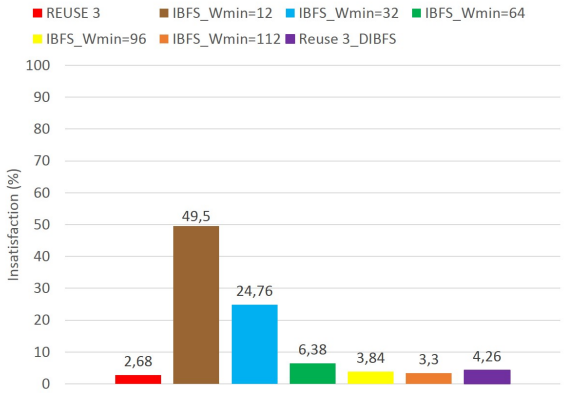
(b) Délai moyen des paquets dans le système.

FIGURE 2.19 – MCPDOR observé et délai moyen dans le scénario à faible charge de trafic.

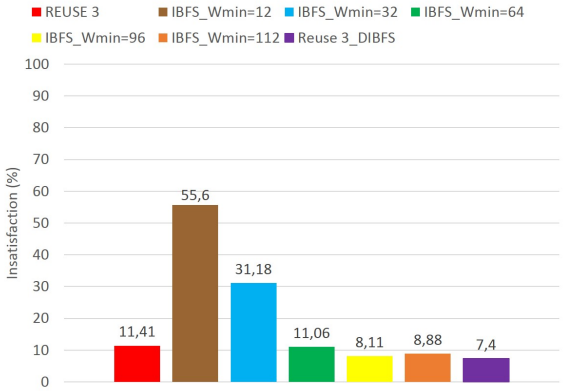
cellule donneuse ne sont pas dégradées avec la solution DIBFS (les résultats sont 0.23 % et qui sont négligeables (Fig. 2.18(b))). La technqiue DIBFS détecte adéquatement la cellule ayant le plus grand niveau de MCPDOR dans le but de balancer équitablement la bande passante en fonction de la charge. De plus, à un instant d'ordonnancement donné, la technique DIBFS s'assure que chaque cellule donneuse possède un nombre suffisant de sous-porteuses dans le but de garder ses utilisateurs connectés. Ainsi, notre solution proposée dépasse hautement les autres schémas en termes d'utilisateurs insatisfaits dans tout le système (figure 2.18(c)), de MCPDOR moyen (figure 2.19(a)) et de délai moyen des paquets de tout le système (figure 2.19(b)).



(a) Insatisfaction moyenne des utilisateurs dans la cellule centrale.



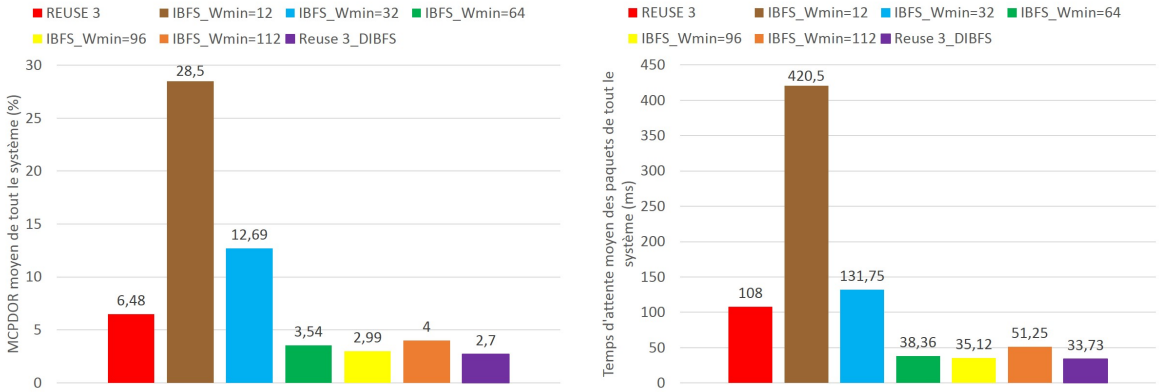
(b) Insatisfaction moyenne des utilisateurs dans les cellules voisines.



(c) Insatisfaction moyenne des utilisateurs dans tout le système.

FIGURE 2.20 – Résultats de l'insatisfaction du scénario à faible charge de trafic - PDOR_{target} = 5 %.

Considérons maintenant le sous-scénario B où les cellules voisines sont caractérisées par une haute charge de trafic par rapport au sous-scénario A. Malgré les bons résultats donnés par l'$IBFS_{W_{min}=12}$ et l'$IBFS_{W_{min}=32}$ dans le sous-scénario A, ces derniers n'arrivent pas à satis-



(a) PDOR moyen des utilisateurs dans le système.

(b) Délai moyen des paquets dans le système.

FIGURE 2.21 – MCPDOR observé et délai moyen dans le scénario à faible charge de trafic.

faire les contraintes de QoS des utilisateurs de la cellule centrale (figure 2.20(a)) et des cellules voisines (figure 2.20(b)) dans le sous-scénario B. En effet, dans les deux cas, le ratio d'insatisfaction atteint une grande valeur, pire que celle du modèle reuse 3. Ces résultats soulignent l'importance de l'adaptation du paramètre W_{min} au contexte. Grâce aux valeurs adéquates de W_{min}, le DIBFS apporte les niveaux les plus faibles en termes d'insatisfaction même sous une haute charge. En effet, pour un faible $PDOR_{target}$ de 5 %, le ratio d'insatisfaction de tout le système est égale à 7.4% avec le DIBFS contre 8.11% avec le meilleur des autres schémas IBFS (figure 2.20(c)).

La figure 2.21(a) montre le ratio total des paquets délivrés après le seuil de 100 ms pour le système global. Comme attendu, dans le cas d'une haute charge de trafic au niveau de la cellule donneuse, l'IBFS avec les plus faibles valeurs seuils de W_{min} ne peut pas respecter les contraintes en termes de délai. Par contre, le DIBFS permet à chaque cellule de respecter ces contraintes et atteint les meilleurs résultats en termes de MCPDOR et temps d'attente moyen des paquets (figure 2.21(b)).

2.5 Conclusion

Les ordonnanceurs multicellulaires combinés avec les ordonnanceurs monocellulaires permettent au système d'avoir une politique d'allocation de ressource plus efficace et adaptée au contexte. En effet, les ordonnanceurs monocellulaires ne suffisent pas à eux seul de gérer la distribution non uniforme des utilisateurs entre les cellules. Dans ce chapitre, nous avons démontré l'intérêt d'employer les algorithmes d'ordonnancement intercellulaires. Il s'agit de transférer dynamiquement de la bande passante des cellules en sous charge vers les cellules surchargées.

Nous avons aussi introduit un indicateur de QoS permettant de sélectionner d'une manière optimale la cellule ayant besoin de plus de ressources par rapport à ses voisines. Enfin, nous avons proposé le concept de la bande passante minimale durant le processus d'allocation dynamique des ressources. Ce paramètre correspond à la quantité minimale de ressources radios que chaque cellule doit garder en sa possession afin de se protéger contre les fluctuations irrégulières de la charge de trafic.

L'exploitation de la diversité fréquentielle apportée par l'OFDM permet aux ordonnanceurs de coordonner l'interférence entre cellules. Dans ce contexte, une politique d'allocation de ressources efficace doit pouvoir aussi diminuer au maximum les interférences intercellulaires. Dans le prochain chapitre, nous nous intéressons à la gestion des interférences intercellulaires à travers les techniques de coordination des interférences. Ces dernières sont basées sur des mécanismes efficaces de gestion des ressources radios à la fois rares et limités. Enfin, nous tenons à souligner que les résultats discutés dans ce chapitre ont fait l'objet de deux publications scientifiques dans des journaux [59, 60].

Algorithme 1 L'algorithme d'ordonnacement DIBFS.

1: **BEGIN**
2: Pour chaque instant d'ordonnancement :
3: **for each** *cell* $i \in C$ **do**
4: Rafraîchir ($MCPDOR_i$, $RW_{used}(i)$, $W(i)$)
5: Calculer le nombre de sous-porteuses disponibles pour être empruntées :
$W_{av}(i) = W(i)[1 - RW_{used}(i)]$
6: **end for**
7: Sélectionner de S la cellule r qui a le plus grand $MCPDOR$
8: **for each** Groupe G telle que $G \in SFB$ et $G \neq group(r)$ **do**
9: Déterminer l'ensemble $SNC(r, G)$
10: Sélectionner la cellule donneuse leader d_G de $SNC(r, G)$:
$Cell\ d_G \leftarrow Cell\ k\ such\ that\ W_{group(r)}(d_G) = Max\{W_{group(r)}(k),\ \forall\ cell\ k \in SNC(r, G)\}$
11: Déterminer l'ensemble $SNC(d_G, group(r))$
12: **if** $W_{group(r)}(d_G) \neq 0$ **then**
13: **if** $Q_{transfer} \leq W_{group(r)}(d_G)$ **then**
14: $W_{group(r)}(r) \leftarrow W_{group(r)}(r) + Q_{transfer}$
15: $W_{group(r)}(d_G) \leftarrow W_{group(r)}(d_G) - Q_{transfer}$
16: **for each** $Cell\ z \in SNC(d_G, group(r))$ **do**
17: $W_{group(r)}(z) \leftarrow W_{group(r)}(z) + Q_{transfer}$
18: **end for**
19: **else**
20: $W_{group(r)}(r) \leftarrow W_{group(r)}(r) + W_{group(r)}(d_G)$
21: $W_{group(r)}(d_G) \leftarrow 0$
22: **for each** $Cell\ z \in SNC(d_G, group(r))$ **do**
23: $W_{group(r)}(z) \leftarrow W_{group(r)}(z) + W_{group(r)}(d_G)$
24: **end for**
25: **end if**
26: **else**
27: Sélectionner de $SNC(r, G)$ la cellule c qui a la plus grande valeur de MCPDOR
28: **if** $W_{av}(c) \geq Q_{transfer}$ **then**
29: $W_{group(c)}(r) \leftarrow W_{group(c)}(r) + Q_{transfer}$
30: $W_{group(c)}(c) \leftarrow W_{group(c)}(c) - Q_{transfer}$
31: **for each** $Cell\ z \in SNC(c, group(r))$ **do**
32: $W_{group(c)}(z) \leftarrow W_{group(c)}(z) + Q_{transfer}$
33: **end for**
34: **else**
35: $W_{group(c)}(r) \leftarrow W_{group(c)}(r) + W_{av}(c)$
36: $W_{group(c)}(c) \leftarrow W_{min}(c)$
37: **for each** $Cell\ z \in SNC(c, group(r))$ **do**
38: $W_{group(c)}(z) \leftarrow W_{group(c)}(z) + W_{av}(c)$
39: **end for**
40: **end if**
41: **end if**
42: **end for**
43: **END**

CHAPITRE 3

ALLOCATION DE RESSOURCE ET GESTION DES INTERFÉRENCES INTERCELLULAIRES

Sommaire

3.1 Introduction **64**

3.2 La réduction et le contrôle des interférences intercellulaires (Inter-Cell Interference Mitigation) **64**

3.3 Classification des techniques ICIC **66**

3.3.1 Classification basée sur le degré de centralisation 66

3.3.2 Classification basée sur le niveau de la coordination 67

3.4 ICIC dans les réseaux LTE **68**

3.4.1 La réutilisation fractionnaire de fréquences FFR (Fractional Frequency Reuse 68

3.4.2 La réutilisation souple de ressources SFR (Soft Frequency Reuse) . . 69

3.5 Études et évaluation de performances des schémas ICIC **70**

3.5.1 Modélisation du système 70

3.5.2 Étude comparative des schémas d'allocation du spectre 72

3.6 Contibution : proposition de techniques ICIC autonomes et dynamiques . **77**

3.6.1 État de l'art et problématique 78

3.6.2 Algorithme de transfert entre les bandes (Bandwidth Handoff Algorithm BHA) 80

3.6.3 Évaluation de performances 83

3.7 Conclusion **89**

3.1 Introduction

Le défi principal pour les planificateurs des réseaux mobiles est d'utiliser le spectre disponible aussi efficacement que possible tout en fouissant une QoS acceptable pour les utilisateurs. De ce fait, ces réseaux sont conçus de sorte à pouvoir fournir un haut débit et une grande capacité. Un facteur unitaire de réutilisation du spectre est souvent privilégié afin d'améliorer l'efficacité spectrale. Ainsi, à cause de la rareté du spectre disponible, toutes les cellules se voient souvent attribuer les mêmes ressources fréquentielles ce qui entraîne des problèmes significatifs en termes d'interférences intercellulaires. Étant donné leurs impacts négatifs sur les performances du système, plusieurs techniques d'atténuation des interférences ont été proposées selon lesquelles, des restrictions coordonnées sont effectuées aux niveaux des ressources fréquentielles et de la puissance de transmission. Dans ce chapitre, nous nous focalisons sur les techniques de coordination intercellulaire des interférences. Nous présentons une étude quantitative de quelques politiques d'allocation du spectre. Nous adaptons notre algorithme d'ordonnancement multicellulaire DIBFS au mode de déploiement FFR (Fractional Frequency Reuse) et nous comparons cette technique à un mode de déploiement de l'état de l'art. Enfin, nous proposons une solution autonome qui permet d'adapter les techniques ICIC à la répartition non uniforme des utilisateurs entre les cellules.

3.2 La réduction et le contrôle des interférences intercellulaires (Inter-Cell Interference Mitigation)

Dans le but d'améliorer la QoS des utilisateurs frontaliers tout en préservant l'efficacité spectrale de la technique Reuse 1, les techniques de réduction des interférences intercellulaires (ICI) jouent un rôle primordial. En effet, la minimisation des interférences intercellulaires permet d'atteindre plusieurs objectifs : i) la maximisation de la capacité de tout le réseau, ii) la maximisation du débit des utilisateurs frontaliers, iii) l'amélioration de la QoS globale du système. En se basant sur les approches utilisées, les techniques de réduction des interférences peuvent être généralement classifiées en trois catégories majeures : annulation des interférences intercellulaires, randomisation des interférences et les techniques de coordinatione des interférences intercellulaires :

- L'annulation des interférences intercellulaires : les techniques d'annulation des interférences intercellulaires ont eu un large succès dans les réseaux radios mobiles durant ces dernières décennies. Le principe de base de ces solutions est de régénérer le signal interférant et de le soustraire du signal reçu. Ces techniques ont été appliquées aux systèmes

CDMA et TDMA mais aussi au standard 3GPP-LTE [61].

D'un point de vue implémentation, l'annulation des interférences ne requièrent aucune modification aux niveaux de la normalisation du système ce qui rend cette technique attractive. Bien que cette solution offre des gains significatifs tout en ayant des algorithmes matures, elle requière un certain échange d'informations en temps réel entre les BSs (toutes les ms) dans le but de maximiser le gain du système. Enfin, l'annulation des interférences peut potentiellement améliorer les performances du réseau seulement dans le cas d'une estimation adéquate du canal de propagation parfois difficile à réaliser.

- La randomisation des interférences intercellulaires : la randomisation des interférences [62] consiste à répartir, dans chaque cellule, les données des utilisateurs à travers des chunks temps-fréquences. Une fois toutes les transmissions requises allouées, une permutation aléatoire de sous-porteuses est effectuée (dans chaque cellule interférente et d'une manière indépendante). Cela se résulte par une dispersion aléatoire de chaque transmission à travers toute la grille temps-fréquence. Ainsi, il se produit un brouillage de sous-porteuses. Ce phénomène fait fluctuer artificiellement le signal interférant reçu par un utilisateur donné et ce tout au long de la transmission de ses données. Cette fluctuation aboutit à un certain gain de diversité en termes d'interférences. En d'autres termes, un signal interférant affecte seulement un nombre limité de sous-porteuses des utilisateurs considérés. De plus, le signal de transmission est codé et donc, tout le flux d'information peut être reconstitué facilement aux niveaux du récepteur. Enfin, nous pouvons dire que l'approche de randomisation des interférences est adaptée dans la pratique aux systèmes. En effet, cette dernière requière une gestion de ressource avec une faible complexité et en plus, elle ne crée pas de surcharge en termes de messages de signalisation pour la coopération entre les cellules.

- La coordination intercellulaire des interférences (ICIC) : les techniques de coordination des interférences intercellulaires ICIC (Inter-Cell Interference Coordination) dans les réseaux employant en général la technique OFDM et en particulier dans le système 3GPP-LTE ont gagné un grand succès dans les milieux académiques et industriels vue la simplicité de leur implémentation. Dans le but de réduire les interférences intercellulaires, les solutions ICIC consistent à appliquer des restrictions coordonnées au niveau de l'allocation des ressources entre cellules voisines. Les ressources qui assurent la coordination peuvent être l'espace, le temps, les fréquences, les codes ou la puissance de transmission. De plus, les restrictions peuvent être, par exemple, le rapport temps/fréquence disponible au niveau de l'ordonnanceur ou/et une restriction au niveau de la puissance de transmission appliquée à certaines ressources temps/fréquences. En d'autres termes, les solutions

ICIC consistent à créer des ressources protégées et de les allouer aux utilisateurs souffrant des interférences intercellulaires, typiquement ceux situés en bordure des cellules. Par contraste, le reste des ressources non protégées sont allouées aux mobiles qui ne sont pas lourdement affectés par les interférences, c'est-à-dire ceux situés aux centres.

3.3 Classification des techniques ICIC

Dans la littérature, nous retrouvons plusieurs formes de classifications des techniques ICIC dont les plus importants sont la classification selon le degré de centralisation et selon le niveau de la coordination.

3.3.1 Classification basée sur le degré de centralisation

Dans ce cadre, les architectures qui résultent de la coopération intercellulaire des interférences peuvent être classifiées en trois classes majeures (figure 3.1) :

- Les architectures ICIC centralisées : ils requièrent la présence d'une entité de gestion centrale pour contrôler tout le réseau. Cette dernière collecte les informations liées à la qualité du canal de transmission ainsi qu'à la demande des utilisateurs en termes de QoS. Ensuite, il s'agit de trouver l'allocation de ressource multicellulaire optimale entre cellules du réseau. Enfin, ce contrôleur central alloue les ressources entre les mobiles (ordonnancement) en se basant sur la distribution des ressources radios globales. Bien que cette approche centralisée offre des résultats optimaux en termes d'allocation de ressources, une grande quantité de messages de signalisation est générées ce qui la rend uniquement adaptée aux réseaux cellulaires de petites tailles [63].

- Les approches décentralisées non-coopératives : ils permettent à chaque cellule de déterminer la manière avec laquelle elle alloue ses ressources sans avoir recours à une coopération avec ses voisines. De ce fait, le réseau peut se passer de l'entité centrale de contrôle. Cette approche est caractérisée par la réduction des messages de signalisation circulant au sein du réseau ainsi qu'elle peut être implémentée facilement. Cependant, elle ne permet pas de garantir une allocation de ressources optimales. Dans ce contexte, les schémas ICIC décentralisés sont adaptées que pour les réseaux cellulaires de grandes tailles [63].

- Les architectures ICIC hybrides : elles sont assimilées à des approches semi-centralisées. En fait, elles ont été proposées afin d'atteindre un certain compromis entre les approches centralisées et décentralisées. Dans ces schémas, une entité centrale de contrôle collecte

les indicateurs de qualité du canal ainsi que la demande des utilisateurs en termes de débit dans le but d'ajuster l'allocation des ressources entre les cellules du réseau. Cependant, l'allocation des sous porteuses entre les mobiles est toujours assurée localement par l'ordonnanceur interne de chaque BS. De cette façon, l'approche hybride est bien adaptée aux réseaux de taille moyenne [63].

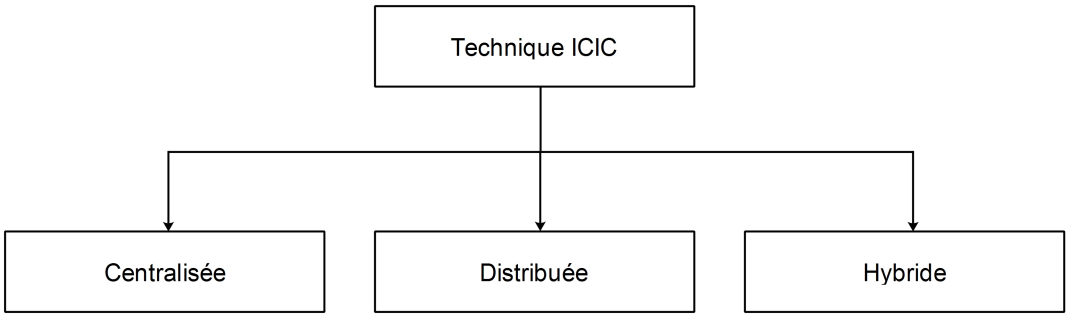


FIGURE 3.1 – Classification des techniques ICIC basée sur le niveau de centralisation.

3.3.2 Classification basée sur le niveau de la coordination

Une mise à jour au cours du temps peut avoir lieu afin de créer les ressources protégées. Cela permet de s'adapter aux variations du trafic ainsi qu'aux changements des conditions de transmission entre les BSs et les mobiles. La latence avec laquelle les messages de coordination sont échangés influe fortement sur la réactivité de ces reconfigurations [25]. Ainsi, nous pouvons distinguer trois niveaux de coordination différents (figure 3.2) :

- La coordination statique : la protection des ressources reste statique au cours du temps mais peut varier sur une longue échelle temporelle (de l'ordre d'une journée)
- La coordination semi-statique : ce type de coordination permet au réseau cellulaire de s'adapter à la distribution non uniforme du trafic mais pas aux variations des états des canaux de transmission. En fait, les messages de signalisation permettant la coordination sont échangés avec une latence de l'ordre d'une dizaine ou une centaine de millisecondes.
- La coordination dynamique : ce type de coordination permet de répondre aux variations rapides du canal de propagation puisque les échanges des signaux de signalisation se déroulent sur une échelle de l'ordre de la milliseconde.

Enfin, nous tenons à souligner que peu importe la manière avec laquelle ces ressources protégées soient créées, les solutions ICIC sont fortement dépendantes de l'ordonnanceur intracellulaire. En effet, c'est ce dernier qui assure l'allocation des ressources aux utilisateurs.

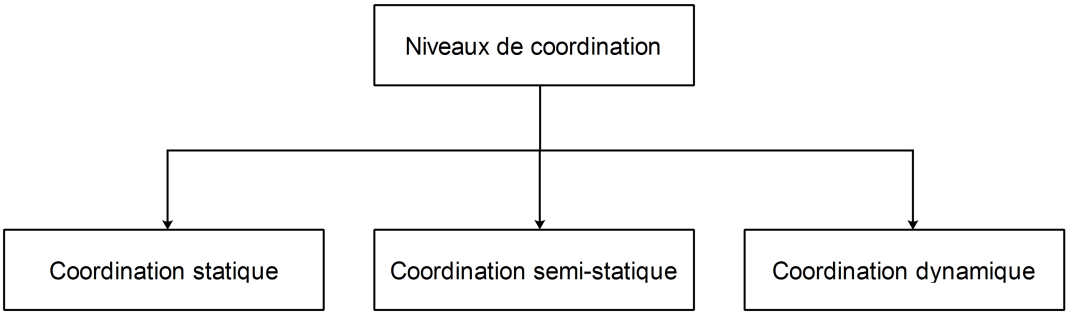


FIGURE 3.2 – Classification des techniques ICIC basée sur le niveau de coordination.

3.4 ICIC dans les réseaux LTE

3.4.1 La réutilisation fractionnaire de fréquences FFR (Fractional Frequency Reuse

D'après ce que nous avons dit dans le dernier chapitre, bien que la technique Reuse-n résolve le problème des interférences intercellulaires, elle ne permet pas d'atteindre un bon niveau d'efficacité spectrale [64, 65]. Le mode de déploiement FFR est une technique ICIC statique et ne requiert aucune coopération entre les BSs [63]. Chaque cellule est divisée statiquement en deux zones : le centre et la bordure. La première zone contient les utilisateurs proches de la station de base CCUs (Cell Center Users) tandis que l'autre zone intègre les mobiles se situant à l'extrémité de la cellule CEUs (Cell Edge Users). Puisque les utilisateurs frontaliers sont plus proches des cellules voisines et relativement loin de leur station de base associée, ils expérimentent un niveau élevé d'interférences intercellulaires en plus des pertes de propagation. Par conséquent, l'objectif principal de FFR est de protéger les ressources radios attribués à ces utilisateurs des interférences.

FFR consiste à modifier la distribution des ressources fréquentielles entre les différentes zones de la cellule dans le but de créer un ensemble de ressource protégées pour les CEUs. Les utilisateurs du centre de la cellule se voient allouer le spectre selon le modèle Reuse 1. Enfin, le modèle de déploiement Reuse 3 est utilisé aux niveaux des extrémités des cellules afin de servir les CEUs avec des ressources radios protégées. La figure 3.3 illustre un cluster de trois cellules LTE où le spectre est alloué entre le centre et la bordure selon FFR.

Comme le spectre est divisé entre une région centrale et une région périphérique, les utilisateurs se situant à l'intérieur et à l'extérieur de la cellule utilisent des ressources fréquentielles différentes. Ainsi, cette technique permet de diminuer les interférences intercellulaires surtout aux niveaux de la bordure des cellules. Cependant, le spectre est sous-utilisé avec FFR puisque les utilisateurs aux niveaux des zones frontalières ne peuvent accéder qu'à une toute petite partie

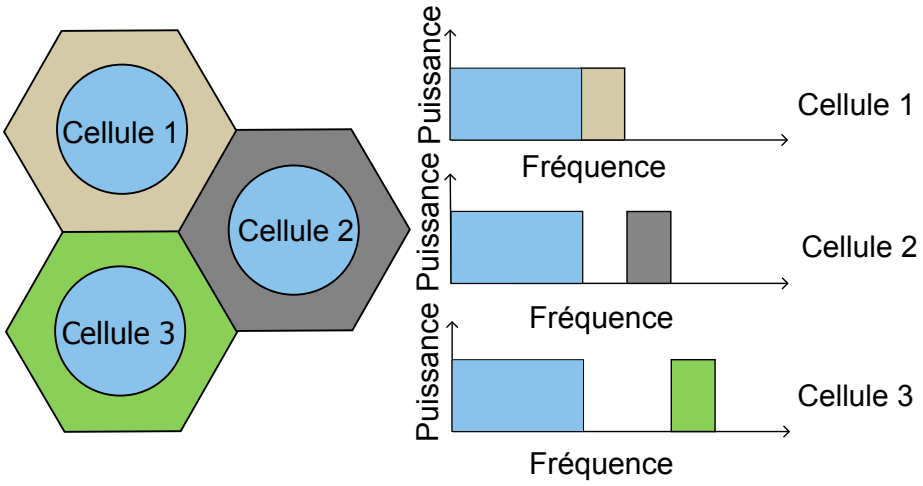


FIGURE 3.3 – La technique Fractional Frequency Reuse (FFR).

de la bande. De plus l'utilisation du Reuse 3 au niveau du bord de la cellule diminue l'efficacité spectrale du système. Enfin, l'inconvénient principal de cette technique statique est que cela ne permet pas d'adapter la distribution des ressources fréquentielles entre les différentes zones selon la demande des utilisateurs.

3.4.2 La réutilisation souple de ressources SFR (Soft Frequency Reuse)

La technique de réutilisation souple des ressources SFR [66] est une solution ICIC statique. La protection des ressources fréquentielles est créée en leur allouant une puissance supérieure à celle assignée aux autres ressources. En outre, SFR a été conçue pour atteindre des niveaux de performances comparables à ceux du modèle Reuse 1 tout en réduisant les interférences. Ainsi, contrairement à la technique FFR, SFR permet l'utilisation de tout le spectre dans la cellule. Cependant, dans le sens descendant, les restrictions se font au niveau de la puissance de transmission allouée à la bande du centre de la cellule afin de réduire les effets des interférences sur les CEUs. En fait, la bande allouée au centre de la cellule est réutilisée par les cellules voisines aux niveaux de leurs bordures. Pour ce faire, une plus faible puissance de transmission est allouée à la bande du centre pour les CCUs et ce par rapport à la bande des CEUs [67]. Le spectre fréquentiel alloué aux CEUs est utilisé avec une puissance de transmission maximale. En effet, les CCUs expérimentent de hautes valeurs de SINR et donc, la puissance de transmission réduite n'aura pas d'effets drastiques sur leur QoS. Cependant, les utilisateurs frontaliers souffrent des plus faibles valeurs de SINR à causes des interférences en plus du pathloss. Dans ce contexte, une augmentation au niveau de la puissance de transmission dans le sens descendant va améliorer leurs performances. La figure 3.4 montre un cluster de trois cellules adjacentes où la technique SFR est déployée. Avec SFR, chaque utilisateur central peut accéder à la sous-bande

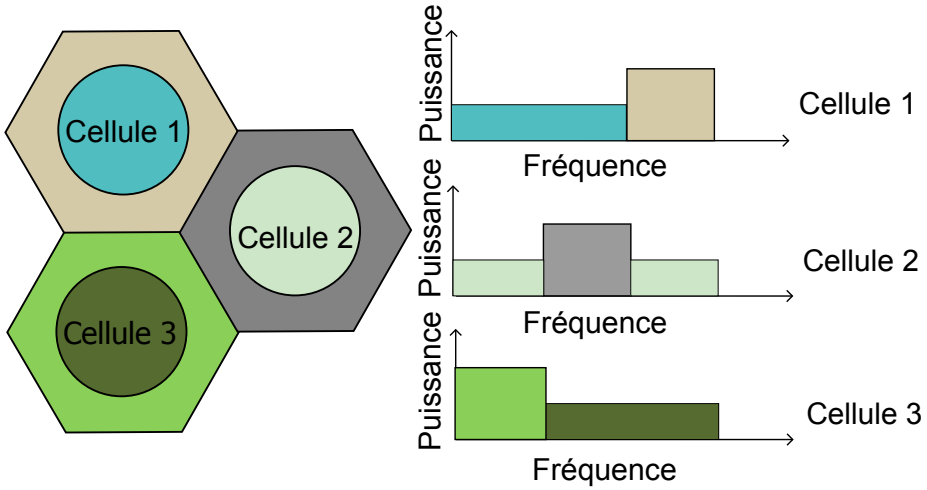


FIGURE 3.4 – La technique Soft Frequency Reuse (SFR).

extérieure mais avec une priorité plus faible.

Contrairement aux schémas FFR et SFR de [28, 64, 68, 69], dans ce travail nous considérons que les utilisateurs extérieurs peuvent accéder à la sous-bande centrale si les deux conditions suivantes sont satisfaites :

- Tous les utilisateurs centraux ont bien été servis par leur sous-bande centrale associée.
- Une partie non occupée est disponible au niveau de la bande centrale. En effet, les utilisateurs centraux sont caractérisés par une bonne qualité de canal, et donc, ils ont une bonne QoS sous une faible charge de trafic. Par conséquent, une partie de la sous-bande centrale peut être inoccupée constituant une perte. Même si les utilisateurs frontaliers possèdent un très faible niveau de SINR au niveau de la sous-bande centrale, celle-ci peut constituer une marge de manœuvre. De plus, cette bande passante additionnelle combinée avec la bande extérieure ne peut que maximiser le débit offert.

3.5 Études et évaluation de performances des schémas ICIC

3.5.1 Modélisation du système

Nous considérons un cluster constitué par une cellule centrale entourée par six autres hexagonales. Chaque cellule est couverte par une BS équipée par une antenne omnidirectionnelle. La transmission sur l'interface radio est basée sur la technique OFDM avec N sous-porteuses disponibles (qui constituent les ressources fréquentielles) et K utilisateurs.

La puissance de transmission par sous-porteuses dépend du schéma d'allocation de ressources employé. Avec le Reuse 1, la puissance totale de transmission P_t est uniformément distribuée entre les N sous-porteuses disponibles. Ainsi, la puissance sur la sous-porteuse n est égale à $P_n = P_t/N$ [63]. Le modèle Reuse 3 utilise seulement le tiers du spectre. Par conséquent, la puissance de transmission par sous-porteuse est égale à $P_n = P_t/(N/3)$.

Dans le but de modéliser le schéma FFR, une quantité N_{center} de sous-porteuses égale à $N/2$ est allouée à la sous-bande intérieure et une autre quantité N_{edge} égale à $N/6$ est allouée à la bande extérieure [63, 70]. La puissance de transmission sur chacune de ces sous-porteuses est donnée par :

$$P_n = \frac{P_t}{N_{center} + N_{edge}}. \tag{3.1}$$

Avec le schéma SFR, toutes les sous-porteuses sont utilisées. Nous considérons que N_{center} est égale à $2N/3$ et N_{edge} est égale à $N/3$ [68]. Cependant, la puissance de transmission $P_{n,edge}$ allouée à une sous-porteuse n de la bande extérieure est plus large que la puissance $P_{n',center}$ allouée à une sous-porteuse n' de la bande intérieure. Pour tous n et n', nous avons $P_{n',center} = \beta P_{n,edge}$, avec β le ratio de puissance ($0 < \beta < 1$). Ainsi :

$$P_{n',center} = \frac{\beta P_t}{\beta N_{center} + N_{edge}}; \tag{3.2}$$

$$P_{n,edge} = \frac{P_t}{\beta N_{center} + N_{edge}}. \tag{3.3}$$

Le gain du canal ${G^{\mathrm{i}}}_{k,n}$ entre la station de base serveuse i et l'utilisateur k sur la sous-porteuse n est donné par :

$${G^{\mathrm{i}}}_{k,n} = h \times 10^{\frac{\chi\sigma}{10}} \times \left(\frac{d_0}{d_{k,i}}\right)^{\alpha}. \tag{3.4}$$

h représente les évanouissements multi-trajets de Rayleigh modélisés par une distribution exponentielle. Le paramètre χ_σ est une variable aléatoire gaussienne standard, σ est l'écart type du shadowing en dB, $d_{k,i}$ est la distance entre l'utilisateur k et la BS i, d_0 est une distance de référence égale à 1 km [71] et enfin, α est l'exposant du pathloss.
Le rapport signal sur interférence et bruit d'un utilisateur k sur une sous-porteuse n associée à la BS i est donné par :

$$\gamma^i_{k,n} = \frac{{P^{\mathrm{i}}}_n {G^{\mathrm{i}}}_{k,n}}{B_{\mathrm{sub}} N_0 + \sum\limits_{j=1, j\neq i}^{I} {P^{\mathrm{j}}}_n {G^{\mathrm{j}}}_{k,n}}, \tag{3.5}$$

avec ${P^{\mathrm{i}}}_n$ est la puissance de transmission sur la sous-porteuse n de la cellule i et ${P^{\mathrm{j}}}_n$ est la

puissance de transmission de la cellule j. Aussi, $G^{j}{}_{k,n}$ est le gain du canal de transmission entre l'utilisateur k e la cellule interférente j sur la sous-porteuse n. Enfin, B_{sub} est l'espacement entre sous-porteuses et N_0 est la densité thermal de puissance du bruit.

Le codage et la modulation adaptative (AMC) sont utilisés afin d'augmenter la capacité du système. Cela consiste à adapter la modulation et le rendement de codage en fonction de la qualité du signal reçu. Nous avons suivi la procédure décrite dans [8] pour réaliser la AMC qui à son tour, est inspirée de [72]. Nous commençons par utiliser la formule de Shannon pour calculer l'efficacité spectrale $\eta_{k,n}$ de l'utilisateur k sur la sous-porteuse n comme ce qui suit :

$$\eta^{i}_{k,n} = \log_2\left(1 + \frac{\gamma^{i}_{k,n}}{\Gamma}\right), \tag{3.6}$$

avec $\Gamma = -\ln(5.E)/1.5$ est un facteur de correction du SNR qui prend en compte la différence entre les performances de la théorie et l'implémentation pratique des AMC [73]. Le paramètre E est un BER cible.
Finalement, nous avons utilisé le tableau 3.1 pour déterminer le nombre de bits qui pourraient être transmis à un utilisateur k sur une sous-porteuse n.

3.5.2 Étude comparative des schémas d'allocation du spectre

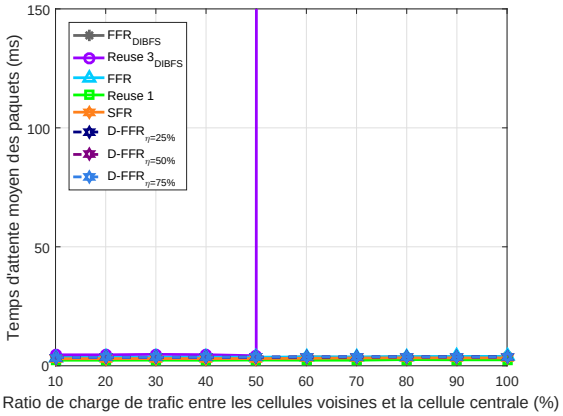
Dans cette section, nous étudions les performances des schémas d'allocation de fréquences présentés dans ce rapport. Nous considérons que les utilisateurs sont uniformément distribués en deux groupes selon leur distance par rapport à la station de base qui leur est associée. Le premier groupe est composé par les utilisateurs centraux (représentent 50 % des utilisateurs) se situant à une distance plus petite que le rayon intérieur de la cellule [68]. Le second groupe contient le reste des utilisateurs frontaliers ayant une distance plus grande que le rayon intérieur. De plus, les utilisateurs de chaque groupe ont la même demande en termes de débit avec le même type de trafic que celui de nos simulations précédentes. Nous supposons que la bande passante totale est composée par 128 symboles OFDM alloués à chaque cellule selon la stratégie d'allocation de ressources adoptée. Aussi, nous avons considéré le même scénario que celui de nos dernieres simulations : nous augmentons successivement la charge de trafic des cellules voisines tout en gardant la même charge dans la cellule centrale. De plus, nous simulons une technique de l'état de l'art appelé Dynamic Fractional Frequency Reuse (D-FFR) [74, 75]. Cette solution est similaire à FFR mais en plus, une partie de sa sous-bande extérieure est disponible afin qu'elle soit partagée entre les cellules voisines. En d'autres termes, dans un cluster donné, la bande partagée est assignée à la cellule qui expérimente la plus haute charge de trafic. Par conséquent, la solution prend en considération la demande de trafic inhomogène et dynamique

TABLE 3.1 – Indice CQI et efficacié pour le LTE [8].

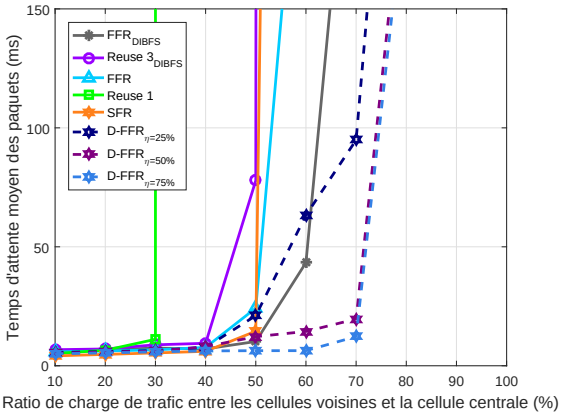
Schéma de modulation	**Approximation du rendement du code**	**Indice de CQI**	**Intervalle pour η**	**Efficacité (bit/symbol)**
Aucune transmission	-	0	0	-
QPSK	0.076	1	0-0.15	0.1523
	0.12	2	0.15-0.23	0.2344
	0.19	3	0.23-0.38	0.3770
	0.3	4	0.38-0.60	0.6016
	0.44	5	0.60-0.88	0.8770
	0.599	6	0.88-1.18	1.1758
16QAM	0.37	7	1.18-1.48	1.4766
	0.48	8	1.48-1.91	1.9141
	0.6	9	1.91-2.40	2.4063
64QAM	0.45	10	2.40-2.73	2.7305
	0.55	11	2.73-3.32	3.3223
	0.65	12	3.32-3.90	3.9023
	0.75	13	3.90-4.52	4.5234
	0.85	14	4.52-5.12	5.1152
	0.93	15	$\geq$ 5.12	5.5547

de la cellule. Cependant cette technique alloue les ressources aveuglément et d'une manière brutale à la cellule surchargée. En effet, elle ne vérifie pas que la quantité de bande qui reste à la cellule donneuse est suffisante afin de garder un bon niveau de QoS. Dans ce contexte, nous considérons trois pourcentages différents η de la sous-bande extérieure partagée. Ces trois variantes sont notées D-FFR$_{\eta=25\%}$, D-FFR$_{\eta=50\%}$ et D-FFR$_{\eta=75\%}$.

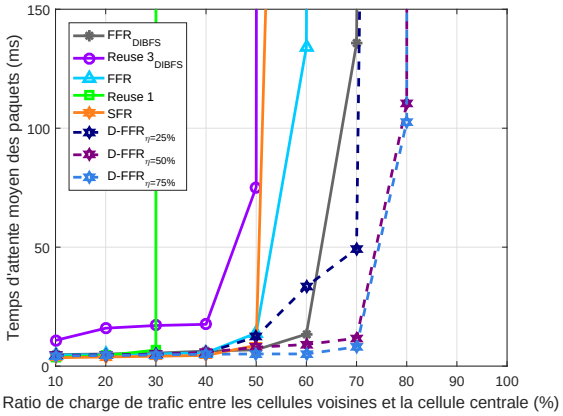
Les figures 3.5(a), 3.5(b) et 3.5(c) montrent respectivement le délai moyen des paquets des mobiles centraux, frontaliers et de tous les mobiles de la cellule surchargée en fonction du ratio de la charge de trafic. Bien que la cellule centrale possède une charge constante pour toutes les simulations, les courbes associées aux différents schémas d'allocation des ressources sont croissantes. En effet, quand la charge de trafic des cellules voisines augmente, plus de sous-porteuses sont consommées afin de satisfaire la demande des utilisateurs. Ceci a pour effet de



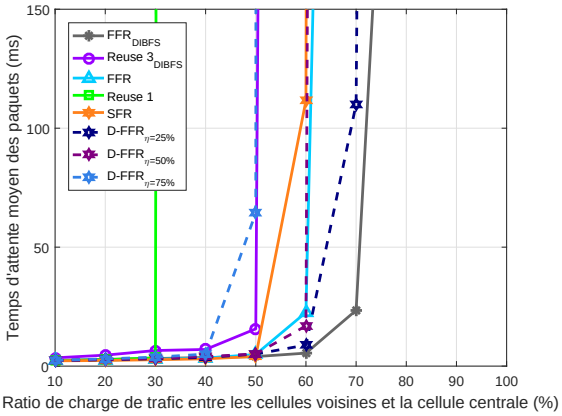
(a) Temps d'attente moyen des paquets des utilisateurs centraux dans la cellule centrale.



(b) Temps d'attente moyen des paquets des utilisateurs fontaliers dans la cellule centrale.

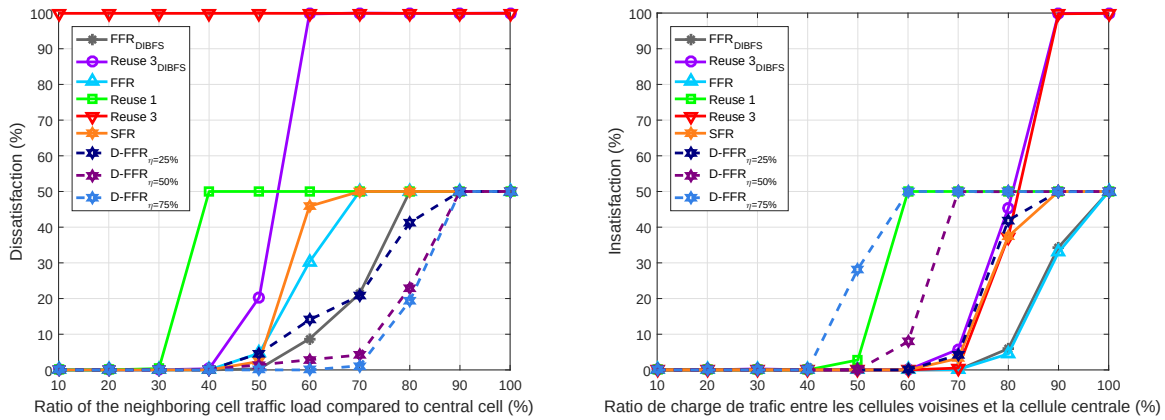


(c) Temps d'attente moyen des paquets des utilisateurs dans la cellule centrale.



(d) Temps d'attente moyen des paquets des utilisateurs dans tout le système.

FIGURE 3.5 – Temps d'attente moyen des paquets.



(a) Insatisfaction moyenne des utilisateurs dans la cellule centrale.

(b) Insatisfaction moyenne des utilisateurs dans une cellule voisine.

FIGURE 3.6 – Insatisfaction moyenne des utilisateurs.

créer plus d'interférence à la cellule centrale. Le modèle Réuse 3 n'est pas représenté ici car il atteint des valeurs de délai infinies. En fait, le tiers du spectre disponible pour chaque cellule est insuffisant pour être partagé par les mobiles et donc, le système devient très vite saturé. Cependant, l'ordonnanceur DIBFS associé au Reuse 3 réduit ce délai surtout quand le ratio de charge de trafic dans les cellules voisines est faible. Les utilisateurs frontaliers du schéma Reuse 1 sont lourdement touchés par les interférences intercellulaires. Par conséquent, leurs délais atteignent des valeurs infinies quand le ratio de charge dépasse 30 %. Le déploiement SFR atteint de meilleures performances que le Reuse 1 principalement pour les utilisateurs frontaliers. La technique FFR est plus efficace que SFR et le Reuse 1 (figure 3.5(c)) bien qu'elle utilise seulement 66 % de la bande passante. En effet, 50 % des mobiles sont localisés dans la région centrale de la cellule et se partagent 50 % de la bande totale disponible (75 % de la bande FFR). Cela permet aux utilisateurs centraux d'atteindre de très faibles valeurs de délai. De plus, selon notre modèle FFR, les mobiles frontaliers peuvent accéder la bande centrale si les exigences de QoS des utilisateurs centraux sont satisfaites. Ainsi, selon FFR, les mobiles frontaliers sont servis par la sous-bande extérieure protégée contre les interférences. En outre, ils bénéficient d'une grande quantité de bande intérieure qui n'est pas utilisée en entier par les mobiles centraux. Nous observons aussi que le gap entre les techniques FFR et FFR_{DIBFS} devient de plus en plus grand quand le ratio de charge des cellules voisines croît. En effet, grâce à notre ordonnanceur intercellulaire, la cellule surchargée peut emprunter des sous-porteuses à partir de la bande extérieure de ses cellules voisines en sous-charge. Cette bande passante additionnelle aide la cellule à augmenter la QoS de ses utilisateurs frontaliers surtout quand ils sont exposés à de hauts niveaux d'interférences.

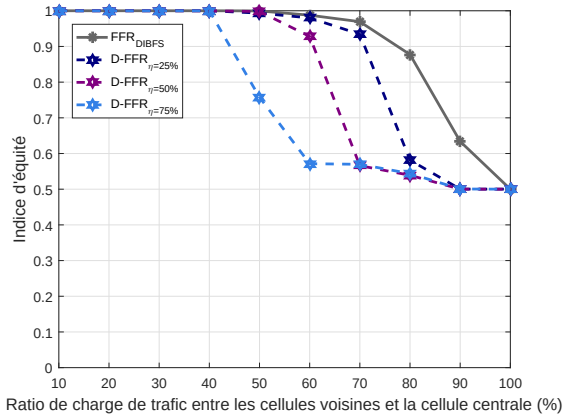


FIGURE 3.7 – Indice d'équité.

Comme attendu, La solution D-FFR atteint de meilleures résultats que ceux de notre solution FFR_{DIBFS} (Fig. 3.5(c)) spécialement quand le ratio de la charge de trafic est élevée. En effet, selon le D-FFR, un nombre de sous-porteuse plus grand est transféré de la cellule en sous-charge vers la cellule en surcharge par rapport au FFR_{DIBFS} (cette quantité devient plus grande quand le pourcentage de bande partagé η augmente). Dans ce contexte, la cellule surchargée est caractérisée par le plus grand nombre de sous-porteuse selon le $D-FFR_{\eta=75\ \%}$. Ceci explique pourquoi cette dernière solution atteint les plus faibles valeurs de délai au niveau de la cellule centrale. Cette technique de l'état de l'art ne prend pas en considération les besoins des cellules donneuses en termes de bande. En fait, une portion de ressource plus faible est laissée aux cellules voisines et qui pourrait être insuffisante afin de leur garantir une bonne QoS. Cela est montré par la figure 3.5(d) dans laquelle nous représentons le temps d'attente moyen des paquets dans tout le système. Dans cette dernière, nous observons que les performances de notre proposition FFR_{DIBFS} surpassent largement le schéma D-FFR quel que soit le pourcentage de sous-bande partagée. Par conséquent, notre stratégie améliore non seulement les performances de la cellule surchargée, mais aussi, réduit le délai de tous les utilisateurs du réseau cellulaire.

La figure 3.6 montre le pourcentage d'utilisateurs insatisfaits au sein de la cellule centrale surchargée (figure 3.6(a)) et pour la cellule voisine donneuse (figure 3.6(b)). La solution D-FFR alloue un pourcentage η de ressources aux régions extérieures de la cellule surchargée. Par conséquent, le ratio d'utilisateurs insatisfaits aux seins des cellules donneuses augmente par rapport au schéma fixe FFR (figure 3.6(b)). Dans le cas contraire, notre stratégie FFR_{DIBFS} diminue le ratio d'utilisateurs insatisfaits dans la cellule surchargée sans dégrader la QoS des cellules adjacentes.

La figure 3.7 conclue notre évaluation de performance. Nous présentons l'indice d'équité de Jain comme fonction de l'insatisfaction des utilisateurs [76]. Cette figure souligne le mieux

les bienfaits du concept de l'adaptation dynamique de la bande passante lors de l'emploie d'une stratégie d'allocation de ressources dynamique. Quel que soit le pourcentage de bande partagée, la solution D-FFR alloue aveuglément la bande entre les cellules. Par conséquent, elle montre le plus faible indice d'équité puisqu'elle diminue le ratio d'utilisateurs satisfaits pour les cellules voisines. Cependant, selon notre proposition, l'ordonnanceur local de chaque station de base calcule d'une manière autonome à chaque instant d'ordonnancement les besoins des mobiles en termes de bande passante et envoie ces informations au schéma DIBFS. Ensuite, l'ordonnanceur multicellulaire agit comme un coordinateur central en allouant dynamiquement les ressources aux cellules tout en se basant sur les valeurs correctes de la bande passante minimale. Par conséquent, une quantité de bande passante minimale est toujours garantie aux cellules donneuses dans le but de les protéger contre les potentiels hauts pics de débit. Ainsi, l'ordonnanceur DIBFS augmente le ratio d'utilisateurs insatisfaits au sein de la cellule surchargée sans détériorer la QoS des cellules voisines. Dans ce contexte, il présente le plus haut indice d'équité pour un haut ratio de charge de trafic (figure 3.7).

3.6 Contibution : proposition de techniques ICIC autonomes et dynamiques

Les futurs réseaux sans fil doivent répondre aux défis liés à l'augmentation de la capacité et ce par un déploiement dense de BSs ainsi que par une réutilisation agressive des ressources fréquentielles. Cependant, dans le but d'atteindre ces objectifs en termes de maximisation de la QoS, il est essentiel de gérer efficacement les interférences intercellulaires causés par l'emploie du même spectre aux seins de plusieurs cellules adjacentes. En effet, ces interférences sont responsables de la détérioration des performances du réseau cellulaire surtout pour les utilisateurs frontaliers. Dans ce contexte, les solutions ICIC ont été conçus afin de limiter ces effets négatifs tout en fournissant une QoS plus adéquate. Typiquement, la bande passante est divisée en une sous-bande intérieure et une autre extérieure. Aussi, les utilisateurs sont classifiés en deux groupes selon leurs positions par rapport à la station de base, c'est-à-dire, des utilisateurs centraux (ou intérieurs) et des utilisateurs frontaliers (ou extérieurs). Les ressources disponibles pour chaque zone sont exclusivement allouées aux utilisateurs appartenant à cette zone. La classification des utilisateurs est usuellement basée sur un seuil qui peut être soit une valeur moyenne du SINR soit une distance moyenne. Cependant, les approches ICIC basées sur ces paramètres statiques ne peuvent pas gérer efficacement la distribution non-homogène des mobiles. Dans cette partie, nous introduisons un algorithme de transfert dynamique qui a pour but d'adapter les schémas ICIC statiques à la distribution non uniforme en termes d'uti-

lisateurs aux seins des deux régions de la cellule. Notre solution classifie dynamiquement les mobiles actifs (centraux et frontaliers) en se basant sur une heuristique d'équilibrage de charge. En fait, chaque cellule reconfigure d'une manière autonome les contraintes d'allocation de sa bande sans modifier la répartition initiale des ressources radios au sein de tout le réseau cellulaire. Cela rend la solution bien adaptée à la répartition non uniforme d'utilisateur à l'échelle multicellulaire.

3.6.1 État de l'art et problématique

L'objectif principal derrière les techniques ICIC est de pouvoir augmenter le débit des utilisateurs frontaliers souffrant des pires conditions de transmission. Par exemple, FFR modifie la distribution des ressources fréquentielles dans chaque cellule afin de réduire les interférences intercellulaires. Au lieu d'employer toute la bande au sein des cellules adjacentes, FFR alloue un spectre disjoint pour les bordures des cellules voisines. Ainsi, le modèle Resue-3 est employé aux extrémités de chaque cellule tandis que le Reuse 1 est déployé pour la partie centrale. D'autres solutions ICIC existent et consistent à modifier la puissance de transmission allouée à chaque bande du spectre disponible dans le sens descendant. Par exemple, SFR alloue une puissance de transmission plus faible pour la bande intérieure par rapport à la bande extérieure. De même, les approches centralisées permettent d'atténuer les interférences intercellulaires et fournissent une allocation de ressources optimale pour tout le réseau OFDM multi-utilisateurs. Toutefois, ces approches génèrent une surcharge supplémentaire en termes de trafic de signalisation et en plus, ils apportent une haute complexité computationnelle. Pour ces raisons, des solutions distribuées et autonomes sont requises. En effet, ces derniers ne requièrent aucune coopération entre les BSs et sont caractérisées par une faible complexité : chaque cellule gère l'allocation de ses ressources fréquentielles localement sans créer des messages de signalisation supplémentaires.

La classification des utilisateurs et la répartition de la bande entre les différentes régions des schémas ICIC ont un impact considérable sur la QoS de la cellule. Ces paramètres de conception sont discutées dans [77]. Les auteurs supposent que la répartition des ressources entre les utilisateurs centraux et ceux de la frontière de chaque cellule est proportionnelle au carré du rapport entre le rayon intérieur (r_{int}) et le rayon de la cellule (R). Ainsi, la bande totale N_{bande} est divisée en deux sous-bandes : N_{int} allouée aux utilisateurs du centre et N_{ext} réservée à ceux de la frontière. Cette répartition pour la technique FFR est donnée par :

$$N_{\text{ext}} = \lfloor \frac{N_{\text{bande}}}{3}(1 - \left(\frac{r_{\text{int}}}{R}\right)^2)\rfloor, \tag{3.7}$$

$$N_{\text{int}} = \lfloor N_{\text{bande}} - 3N_{\text{ext}} \rfloor, \tag{3.8}$$

avec $\lfloor x \rfloor$ est une fonction qui retourne la partie entière de x.
Pour le mode de déploiement SFR, la répartition de la bande passante est donnée par :

$$N_{\text{int}} = \lfloor N_{\text{band}} \left(\frac{r_{\text{int}}}{R} \right)^2 \rfloor, \tag{3.9}$$

$$N_{\text{ext}} = \min \left(\lfloor (N_{\text{band}})/3 \rfloor, N_{\text{band}} - N_{\text{int}} \right). \tag{3.10}$$

Dans ce contexte, tous ces paramètres doivent être configurés en avance par le planificateur du réseau cellulaire. De plus, cette solution est optimale seulement dans le cas où les utilisateurs sont uniformément distribués à travers le réseau. Cependant, dans les scénarios réalistes, il n'y a aucune raison à ce que les mobiles soient uniformément distribués que ce soit à l'échelle d'une seule cellule ou bien au niveau de tout le réseau cellulaire.

Dans [78], les auteurs introduisent une méthode ICIC décentralisée et dynamique où les informations concernant la bande passante externe sont échangées à travers l'interface X2. Cette solution consiste à optimiser (rétrécir/croître) la bande passante externe en se basant sur le niveau des interférences. Cependant, chaque BS sélecte un nombre prédéterminé de ressources fréquentielles comme sous-bande extérieure quelle que soit la distribution des utilisateurs frontaliers. Par conséquent, cette technique ne peut pas gérer les situations où un très grand nombre de mobiles sont classifiés comme utilisateurs frontaliers. En effet, la bande extérieure prédéterminée pourrait être insuffisante pour les servir.

Dans le but de classer les mobiles entre les deux groupes, trois approches ont été considérées dans [79]. La première consiste à employer un seuil de distance : si la distance entre la station de base et l'utilisateur est plus faible qu'un certain seuil, cet utilisateur sera servi avec la sous-bande du centre ; sinon, il sera servi en employant la sous-bande extérieure. Le second schéma est similaire au premier mais il est basé sur le SINR comme critère au lieu de la distance. Les auteurs discutent aussi d'une troisième technique basée sur un algorithme d'équilibrage de charge appelé LBA. Cet algorithme prend en considération la disponibilité des ressources de chaque sous-bande ainsi que le débit total qui pourrait être fourni à ces utilisateurs. Les résultats de la simulation montrent que cette technique donne de meilleures performances que les deux autres derniers schémas. Cependant, cette solution n'est optimale que si les sous-bandes où le Reuse 1 et le Reuse 3 sont employés ne sont pas saturées. En effet, si le système est surchargé, la stratégie LBA va prendre de mauvaises décisions en assignant les utilisateurs aux différentes sous-bandes.

Dans [74], une technique d'allocation de ressource distribuée et centralisée a été introduite.

Cette approche a pour but d'améliorer les performances des utilisateurs centraux et frontaliers en leur allouant plus de ressources par rapport au schéma fixe FFR. L'allocation de ressources dépend de la surface centrale de chaque cellule ainsi que du débit requis par toutes les cellules. Bien que la solution proposée montre de meilleures résultats par rapport au schéma FFR conventionnel, elle requière l'échange d'une très grande quantité de messages de signalisation vue la présence du contrôleur central.

Dans cette partie, nous introduisons un nouvel algorithme d'équilibrage de charge dans le but de redistribuer équitablement les utilisateurs entre les différentes sous-bandes ICIC. Notre solution consiste à calculer le nombre moyen d'utilisateur que chaque zone peut supporter en se basant sur une technique d'équilibrage de charge. En fait, notre proposition a pour but d'aider les cellules surchargées afin d'absorber les congestions de trafic. Cela diminue le taux d'utilisateurs insatisfaits et ce par une répartition plus adéquate des utilisateurs entre les sous-bandes. De plus, notre solution est adéquate pour la distribution non uniforme des utilisateurs entre les cellules. En effet, chaque cellule s'auto-reconfigure d'une manière autonome quelles que soient les décisions prises par les autres cellules. Par conséquent, aucun message de signalisation supplémentaire n'est requis entre les différents nœuds du réseau.

3.6.2 Algorithme de transfert entre les bandes (Bandwidth Handoff Algorithm BHA)

Notre proposition appelée Bandwidth Handoff Algorithm (BHA), consiste à tranasférer les mobiles des sous-bandes ICIC surchargées vers les sous-bandes en sous-charge. Ceci a pour but de balancer équitablement la charge entre les zones centrales et frontalières. La solution est conçue pour le sens descendant des réseaux OFDMA multi-utilisateurs et ne requière aucune coopération entre les BSs. Ainsi, notre solution modifie seulement le rayon intérieur de chaque cellule sans reconfigurer la répartition initiale de la bande. Cela la rend adaptée à la distribution non uniforme des mobiles à l'échelle multicellulaire.

Dans ce contexte, le schéma d'équilibrage de charge peut être exprimé par :

$$\frac{K_c T_c}{N_c C_c} = \frac{K_e T_e}{N_e C_e}, \tag{3.11}$$

avec :

- K_c et K_e sont respectivement le nombre moyen d'utilisateurs centraux et d'utilisateurs frontaliers.

- T_c et T_e sont respectivement les débits instantanés des mobiles centraux et frontaliers. En effet, nous supposons que les utilisateurs sont caractérisés par un trafic variable, dynamique et réaliste avec une haute sporadicité.

- N_c et N_e sont le nombre de sous-porteuse disponible aux niveaux des sous-bandes centrales et frontalières.

- C_c et C_e sont le nombre moyen de bits par sous-porteuse allouée aux deux groupes d'utilisateurs respectivement, ceux du centre et de la frontière. En fait, nous supposons que l'allocation des ressources fréquentielles et gérée par l'ordonnanceur de chaque station de base (*i.e* le Round Robin, le MaxSNR ou le Proportional Fair et ce à chaque instant d'ordonnancement.

Cette équation d'équilibrage de charge a pour but d'optimiser la distribution des utilisateurs à travers les sous-bandes ICIC tout en absorbant les pics de trafic au sein des cellules congestionnées.

Puisque le nombre d'utilisateurs centraux est égale à K-K_e avec K le nombre total d'utilisateur, nous pouvons déduire ce qui suit à partir de l'équation 3.11

$$K_c = \frac{KT_eN_cC_c}{T_eN_cC_c + T_cN_eC_e}. \tag{3.12}$$

L'algorithme 2 montre le fonctionnement de notre proposition. Nous commençons par collecter les indicateurs de qualité de canal (Channel Quality Indicator CQI) qui sont envoyés par chaque utilisateur comme signaux de signalisation. Les paramètres CQI donnent des informations sur le niveau de SINR des mobiles dans le but de les trier dans un ordre décroissant. Le débit requis par chaque groupe est supposé être connu par chaque eNodeB et il est rafraîchi durant chaque période d'ordonnancement. Dans notre modèle, nous avons choisi le Proportional Fair (PF) comme ordonnanceur monocellulaire. Il s'agit d'allouer les ressources fréquentielles à un mobile j quand ses conditions radios sont les plus favorables tout en respectant ses moyennes temporelles :

$$j = \text{argmax}_k(\frac{m_{k,n}}{D_k}), k = 1, ..., K, \tag{3.13}$$

avec $m_{k,n}$ le nombre maximum de bits qui peuvent être transmis sur la sous-porteuse n allouée au mobile k. Cette valeur est calculée selon notre modèle présenté dans la section précédente. Le paramètre D_k est le débit moyen fourni par l'ordonnanceur à l'utilisateur k durant les périodes d'ordonnancement précédentes. Le nombre moyen de bits alloué aux deux groupes d'utilisa-

Algorithme 2 Algorithme de transfert inter-bande

1: **BEGIN**
2: Tous les utilisateurs envoient les CQI à leurs stations des bases
3: Rafraîchir les valeurs de (K_c, K_e, C_c, C_e, T_c, T_e)
4: Trier les utilisateurs selon un ordre décroissant selon leur CQI
5: Calculer K_{th} le nombre maximal d'utilisateurs centraux qui peuvent être assignés à la sous-bande centrale
$K_{th} = \frac{K\ T_e\ N_c\ C_c}{T_e\ N_c\ C_c + T_c\ N_e\ C_e}$
6: **if** ($K_c < K_{th}$) **then**
7: $K_c = K_c + 1$
$K_e = K - K_c$
8: **else if** ($K_c > K_{th}$) **then**
9: $K_c = K_c - 1$
$K_e = K - K_c$
10: **else**
11: laisser la même distribution des utilisateurs
12: **end if**
13: **for** $k := 1$ **to** K **do**
14: **if** $k \leq K_c$ **then**
15: Ordonnancer l'utilisateur k avec la sous-bande intérieure
16: **else**
17: Ordonnancer l'utilisateur k avec la sous-bande extérieure
18: **end if**
19: **end for**
20: **END**

teurs (C_c et C_e) est aussi calculé par l'ordonnanceur PF durant les périodes précédentes d'ordonnancement. La répartition des utilisateurs (K_c et K_e) est fixée durant le dernier temps d'exécution. Ainsi, ces paramètres sont initialisés au début à des valeurs adéquates. L'algorithme BHA calcule le nombre moyen d'utilisateurs qui peuvent être assignés à la sous-bande intérieure en se basant sur les contraintes d'équilibrage de la charge indiquée par l'équation (3.12). Toutefois, si notre solution s'arrête à cette étape, un problème important va se produire comme c'est illustré par l'exemple qui suit. À un instant d'ordonnancement t, nous avons 10 utilisateurs centraux servis par la sous-bande intérieure. À l'instant d'ordonnancement suivant $t+1$, le nombre d'utilisateurs centraux mis à jour afin d'être assigné à la sous-bande intérieure est égale à 18. Dans le but de garantir une charge équilibrée, 8 utilisateurs doivent être considérés comme centraux. Dans ce cas, transférer en un seul coup un grand nombre de mobiles entre les deux sous-bandes va causer une instabilité au système. Dans le but d'éviter ce problème, l'algorithme BHA transfère uniquement un seul mobile durant chaque processus (ligne 6 à la ligne 11).

Finalement, l'ordonnanceur PF alloue les ressources en se basant sur la répartition correcte des utilisateurs entre les sous-bandes.

3.6.3 Évaluation de performances

3.6.3.1 Hypothèses et paramètrages de la simulation

Dans cette section, nous évaluons les performances de notre solution BHA tout en la comparant aux techniques ICIC de l'état de l'art.

Nous supposons que tous les utilisateurs tournent la même application vidéoconférence avec un débit moyen égale à 120 Kbps. Ce type d'application réaliste produit de hauts pics de débit avec une haute sporadicité tout en ayant des contraintes de délais très strictes. Cela complique significativement la tâche de l'ordonnanceur. De plus, chaque utilisateur possède uniquement un seul flux actif composé d'un trafic vidéo MPEG-4 [57] et un autre trafic audio [58].

Le rayon intérieur de la cellule est un paramètre très important des techniques ICIC. Il permet de déterminer le nombre d'utilisateurs centraux. Il est fixé par le concepteur du réseau cellulaire en se basant sur la QoS fournie aux mobiles dans chaque zone. Dans [77], les auteurs introduisent une méthode basée sur des formules mathématiques dans le but de déterminer la répartition entre les sous-bandes. Aussi, selon ce papier, les schémas ICIC maximisent le débit quand ce rayon intérieur est égal à 0.65 fois le rayon de la cellule (R). Dans ce travail, nous supposons que la bande passante totale est composée de 75 sous-porteuses OFDM. En considérant ce nombre de sous-porteuses, ce rayon intérieur optimal et l'équation de [77] mentionnée dans la première section, nous déterminons la taille de chaque sous-bande en termes de sous-porteuses. Cependant, pour notre solution BHA, nous supposons une autre configuration de la bande comme cela a été décrit dans la modélisation de notre système. Le tableau 3.2 représente le reste de nos paramètres de simulation. Finalement, les résultats de la simulation ont été obtenus à travers un simulateur à événements discrets.

3.6.3.2 Métrique d'évaluation des performances

Dans cette étude d'évaluation des performances, nous nous intéressons à l'insatisfaction des utilisateurs qui, comme pour les autres chapitres, est toujours basée sur le PDOR. De plus, nous considérons le délai de réception des paquets, le ratio d'utilisation de la bande ainsi que l'indice d'équité (Fairness Index) :

- Délai de réception des paquets : au niveau de la couche MAC, nous supposons que les

TABLE 3.2 – Paramètres de la simulation.

Paramètres	**Valeur**
Nombre de cellules	10 pour le scénario 1 et 7 pour le scénario 2
Rayon de la cellule (R)	500 m
Seuil de distance	$0.65R$
Nombre de sous-porteuse (Symbole OFDMA)	75
Ratio de puissance de SFR	0.25
Ordonnanceur	Proportional Fair (PF)
Puissance de transmission de la BS	20 W (43 dBm)
Déviation standard du shadowing	$\sigma = 8dB$
Évanouissement multitrajet	Rayleigh fading
BER target	5.10^{-5}
Espace entre les sous-porteuses	15 kHz
Densité thermique de la puissance du bruit (N_0)	-174 dBm/Hz
$PDOR_{target}$	5%
Seuil de délai	100 ms

flux de trafic sont arrangés en blocs de bits de même taille qu'on appelle paquets. Le délai (retard) des paquets est le temps entre l'apparition du paquet dans la file d'attente de transmission et le temps de sa réception par l'utilisateur. Il correspond au temps d'attente dans les buffers de transmission si les délais de propagation et de transmission sont négligés.

- Ratio d'utilisation de la bande : les résultats concernant le ratio d'utilisation de la bande passante sont collectés à travers la simulation. Ce paramètre est égal au nombre de sous-porteuse alloué par une cellule à ses propres utilisateurs divisé par le nombre total de ses sous-porteuses.
- Indice d'équité (Fairness Index) : le fairness index (indice de Jain) indique le niveau d'équité des schémas d'allocation de ressources. Dans ce travail, nous considérons que

cet indice est relié au délai. Il est donné par :

$$J(\overline{R}_1, \overline{R}_2, ..., \overline{R}_{|K|}) = \frac{(\sum_{k=1}^{|K|} \overline{R}_k)^2}{|K|. \sum_{k=1}^{|K|} \overline{R}_k^2}. \tag{3.14}$$

La valeur de J indique le niveau d'équité à partir d'un ensemble de valeurs de délais. Le paramètre $|K|$ représente le nombre d'utilisateurs et $\overline{R}_k$ est le délai moyen d'un mobile K. Cet indice atteint ses valeurs maximales quand tous les utilisateurs sont caractérisés par un même délai. Ainsi, une technique d'allocation de ressource efficace réduit la différence en termes de délai entre les utilisateurs centraux et frontaliers et donc, elle diminue les valeurs de l'indice de Jain.

3.6.3.3 Scénario 1 : distribution non homogène des utilisateurs entre les cellules

Dans ce scénario, nous adressons la problématique de la distribution non uniforme des utilisateurs entre les cellules. Nous soulignons aussi les bénéfices de l'adaptation dynamique du rayon intérieure en comparant notre solution aux techniques ICIC de l'état de l'art [77].

Nous simulons deux cellules cibles entourées de 8 autres voisines. Nous supposons que ces cellules sont caractérisées par une répartition non-uniforme en termes d'utilisateurs entre les zones : la première contient 10 utilisateurs centraux et 15 frontaliers tandis que la seconde contient 20 mobiles au centre et seulement 5 à la bordure.

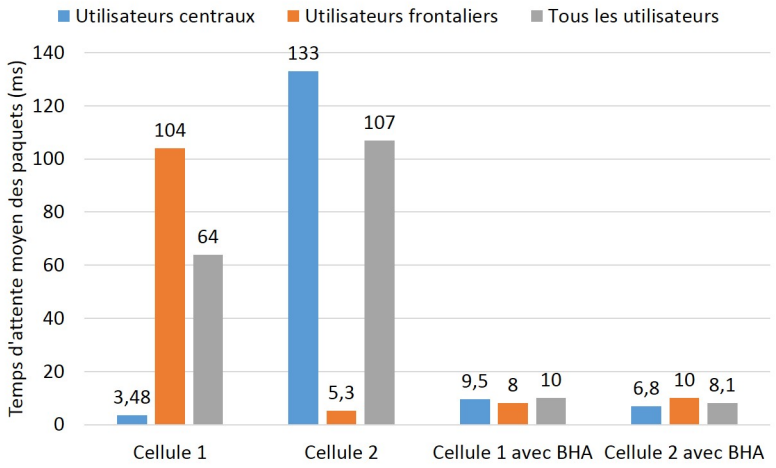


FIGURE 3.8 – Temps d'attente moyen des paquets dans les buffers.

La figure 3.8 montre le délai moyen des deux cellules cibles avec le déploiement ICIC statique FFR et avec la solution BHA. Les résultats montrent un gap significatif entre les mobiles

centraux de la cellule 1 et de la cellule 2. Cette différence est aussi observée pour les utilisateurs frontaliers. De plus, nous remarquons que le déploiement de FFR fournit de hautes valeurs de délais dépassant les 100 ms. En fait, à cause du seuil de distance fixe, les utilisateurs sont assignés statiquement à chaque sous-bande quelle que soit leur distribution entre les deux régions de la cellule.

Notre solution consiste à basculer les mobiles de la sous-bande surchargée vers la sous-bande en sous-charge. Par conséquent, le temps d'attente moyen des paquets est réduit de 104 ms à 8 ms pour les utilisateurs frontaliers de la cellule 1 (et de 133 ms à 6.8 ms pour les mobiles du centre de la cellule 2). En plus, puisque plus d'utilisateurs sont assignés par la solution BHA à la sous-bande intérieure de la cellule 1, nous observons une faible augmentation au niveau du délai des mobiles centraux de la cellule 1. Cependant, cela n'a aucun impact sur la QoS globale étant donné que le délai moyen de la cellule 1 est aussi réduit de 54 ms.

La figure 3.9 représente le ratio de ressources radios utilisées par la sous-bande du Reuse 1, du Reuse 3 et en moyenne pour toutes les cellules selon le FFR classique et la solution BHA. Comme attendu, la cellule 1 utilise seulement une faible quantité de sa sous-bande intérieure et 100% de sa sous-bande extérieure. Au contraire, sa cellule voisine exploite toute sa sous-bande intérieure et seulement 67.4% de sa sous-bande extérieure. D'une part, notre solution maximise l'utilisation des ressources radios des sous-bandes en sous-charge. D'autre part, elle délivre un espace de répit aux utilisateurs dans les zones surchargées puisque le ratio d'utilisation de la bande est réduit. Par conséquent, le schéma BHA réduit le gaspillage de la bande puisqu'il maximise l'utilisation de la bande passante totale au sein des deux cellules.

Les résultats de la figure 3.10 indique que la technique FFR statique possède un indice d'équité faible pour les deux cellules. En effet, le schéma statique est non adapté aux situations selon lesquels un grand nombre d'utilisateurs sont classifiés comme centraux ou frontaliers. Par conséquent, l'écart de délai entre les mobiles croît. L'objectif de la solution BHA est de diminuer le nombre de mobiles de la sous-bande extérieure de la cellule 1. Il s'agit aussi de diminuer le nombre d'utilisateurs de la sous-bande centrale de la cellule 2 sans avoir recours à une coopération entre les cellules. Dans ce contexte, la nouvelle solution donne la plus haute valeur de l'indice d'équité.

3.6.3.4 Scénario 2 : cellules avec différentes répartitions d'utilisateurs

Dans ce scénario nous étudions l'impact de la distribution des utilisateurs entre les deux régions de la cellule sur les performances du système. Nous simulons un cluster de sept cellules adjacentes et hexagonales. Ce cluster contient une cellule centrale équipée d'une BS omnidirectionnelle ayant six autres BSs voisines. Nous focalisons notre étude sur cette cellule centrale

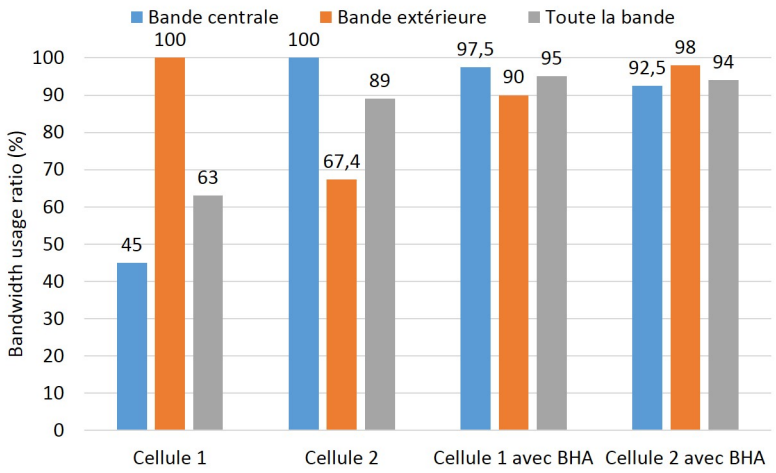


FIGURE 3.9 – Ratio d'utilisation de la bande.

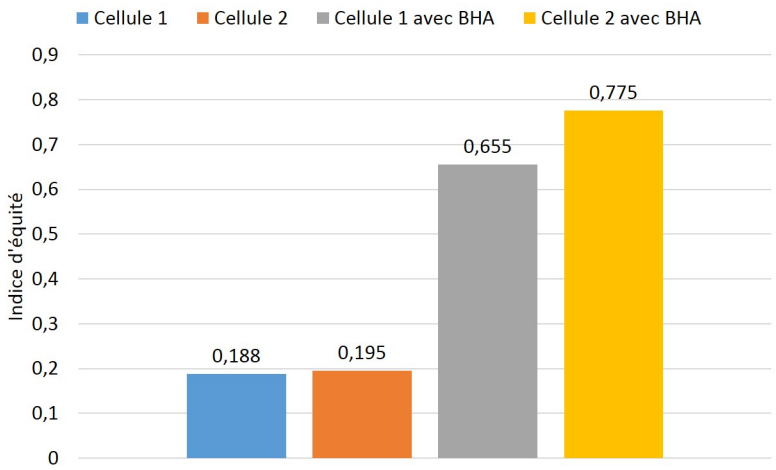


FIGURE 3.10 – Indice d'équité.

contenant 24 utilisateurs. Les mobiles sont placés uniformément dans chaque cellule de sorte à ce que le nombre d'utilisateurs centraux varie entre 2 et 22 (entre 8.3% et 91.6% du nombre total d'utilisateurs). Dans ce sens, cette étude sera réalisée sous différents niveaux de distributions non-uniformes d'utilisateurs entre les zones des cellules.

Dans la figure 3.11, nous représentons le taux d'insatisfaction des utilisateurs en fonction de leur répartition entre les deux zones. Quand la majorité des mobiles sont situés aux niveaux des frontières, les résultats montrent que la solution BHA autonome et dynamique appliquée à FFR et SFR est caractérisée par le plus faible taux d'insatisfaction. En effet, l'insatisfaction est divisée par deux pour le schéma FFR quand il y a 10% de mobiles dans la région centrale. Ce taux est aussi divisé par 3 pour le SFR_{BHA} par comparaison au SFR conventionnel. Quand la

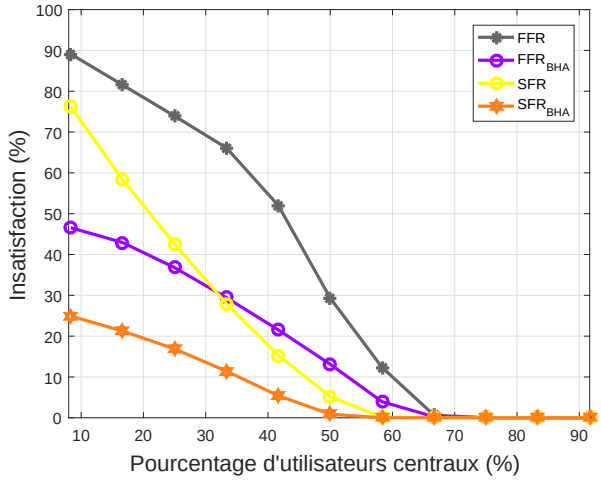


FIGURE 3.11 – Insatisfaction moyenne des utilisateurs dans la cellule centrale $PDOR_{target} = 5\%$.

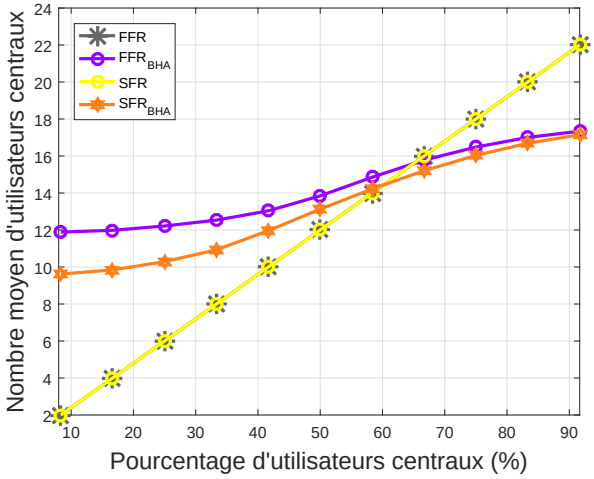


FIGURE 3.12 – Nombre moyen d'utilisateurs assignés à la sous-bande intérieure.

majorité des mobiles sont situés dans la région périphérique de la cellule, même s'ils sont protégés contre les interférences intercellulaires avec le concept ICIC, la faible quantité de bande extérieure disponible peut être insuffisante afin de tous les servir. Dans ce cas, notre technique bascule ces utilisateurs de la sous-bande extérieure surchargée vers la sous-bande intérieure. Ceci est montré par la figure 3.12 dans laquelle nous représentons le nombre d'utilisateurs assignés à la sous-bande centrale. Prenons maintenant en considération la partie gauche du graphique qui reflète le cas où la majorité des mobiles se situent dans la région extérieure. D'après les deux techniques statiques ICIC, quand le pourcentage de mobiles centraux est égal à 8.3%, seulement deux utilisateurs sont affectés à la sous-bande centrale et 22 mobiles à la sous-bande extérieure. Cependant, grâce à la solution BHA, 10 utilisateurs sont considérés comme centraux pour SFR_{BHA} et 12 pour FFR_{BHA}. Cela a pour effet de diminuer l'insatisfaction et d'améliorer

les performances du système. Nous remarquons aussi que le même processus se produit quand la majorité des utilisateurs sont situés dans la région centrale. En effet, ils se font basculer à la sous-bande extérieure dans le but de satisfaire les exigences de l'équation d'équilibrage de la charge.

3.7 Conclusion

Les demandes croissantes en termes de données dans les réseaux mobiles ainsi que l'augmentation exponentielle des applications mobiles ont conduit les opérateurs à appliquer des modèles d'allocation du spectre très dense afin de diminuer le taux d'utilisateurs insatisfaits et améliorer la QoS offerte. Cependant, cela a pour effet de créer des interférences intercellulaires qui vont dégrader la QoS des utilisateurs. Les techniques ICIC ont été proposées afin de faire face à cette problématique en créant des ressources fréquentielles protégées contre les interférences.

Dans ce chapitre, nous avons fait un état de l'art sur les différentes approches permettant de gérer les interférences intercellulaires. Nous avons fait une analyse quantitative de certains schémas d'allocation du spectre. Enfin, nous avons introduit une solution autonome permettant d'adapter les techniques ICIC à la distribution non uniforme des utilisateurs aux seins du réseau.

La densification des réseaux mobiles entraîne l'augmentation des dépenses d'investissement et d'exploitation des opérateurs. Dans ce contexte, l'architecture C-RAN a été proposée. Le prochain chapitre sera consacré à la présentation de cette nouvelle technologie.

CHAPITRE 4

ALLOCATION DES RESSOURCES DANS LE CADRE DU C-RAN

Sommaire

4.1 Introduction 92

4.2 Le C-RAN : évolution de l'architecture de la station de base 92

4.2.1 L'architecture traditionnelle 92

4.2.2 Station de base avec des têtes de transmission radio (RRHs) 92

4.2.3 Architecture des stations de base basées sur le C-RAN 94

4.3 Les avantages du C-RAN 95

4.3.1 Adaptation au trafic non-uniforme 97

4.3.2 Économies en termes d'énergie et de coûts 98

4.3.3 Amélioration de la capacité, de l'efficacité spectrale et diminution des délais 98

4.3.4 Facilité de mise à niveau et de maintenance du réseau 98

4.4 Contribution : adaptation dynamique des stratégies d'association entre RRHs et BBUs 99

4.4.1 Contexte 99

4.4.2 La solution proposée 101

4.4.3 Évaluation de performances 106

4.5 Conclusion 111

4.1 Introduction

Pour pouvoir garantir leurs revenus, les opérateurs doivent minimiser les coûts d'investissement et d'opération de leurs infrastructures. Le Cloud Radio Access Network (C-RAN) est une nouvelle solution technologique permettant d'optimiser l'architecture du réseau d'accès radio. Cette architecture consiste à séparer les têtes de transmission radio (RRHs) des unités de traitement en bande de base (BBUs) afin de faire un meilleur usage des ressources du réseau. Dans ce chapitre, nous analysons les aspects architecturaux liés à l'évolution de la station de base. Nous présentons les différents modes d'association possibles entre les BBUs et les RRHs et nous en proposons un nouveau basé sur le concept de tranche (network slicing).

4.2 Le C-RAN : évolution de l'architecture de la station de base

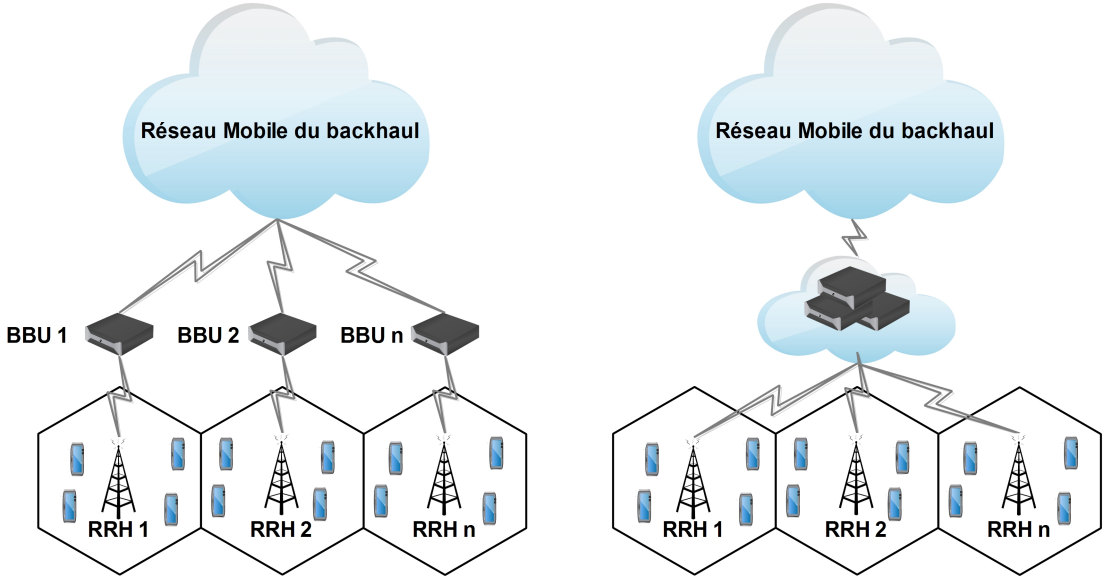
Le C-RAN est une architecture réseau dans laquelle les ressources de traitement en bande de base (baseband resources) sont regroupées de telle sorte qu'elles soient utilisées en un même lieu par plusieurs stations de base. La figure 4.1 donne un apperçu global sur l'architecture C-RAN. Parmi les fonctionnalités principales des modules de traitement en bande de base nous pouvons trouver le codage, la modulation, les transformées de Fourier rapides (FFT), la transposition en fréquence etc. Le module radio est responsable du filtrage fréquentielle et de l'amplification de puissance [4]. Cette section parle de l'évolution de l'architecture des stations de base ainsi que des concepts basiques du C-RAN.

4.2.1 L'architecture traditionnelle

Traditionnellement, les fonctionnalités radios et l'unité de traitement en bande de base sont intégrées au sein de la station de base. L'antenne est généralement localisée près du module radio (quelques mètres) comme c'est montré par la figure 4.2(a). Un câble coaxial est alors employé pour les connecter ce qui entraîne d'énormes pertes. Ce type d'architecture est populaire pour le déploiement des réseaux radios mobiles 1G et 2G.

4.2.2 Station de base avec des têtes de transmission radio (RRHs)

Selon ce type d'architecture, la station de base est séparée en une unité radio et en une unité de traitement en bande de base comme le montre la figure 4.2(b). L'unité radio est appelée RRH. Cette dernière est interconnectée avec la fibre et assure la conversion numérique/analogique,



(a) Réseau d'accès radio avec les RRHs. (b) C-RAN.

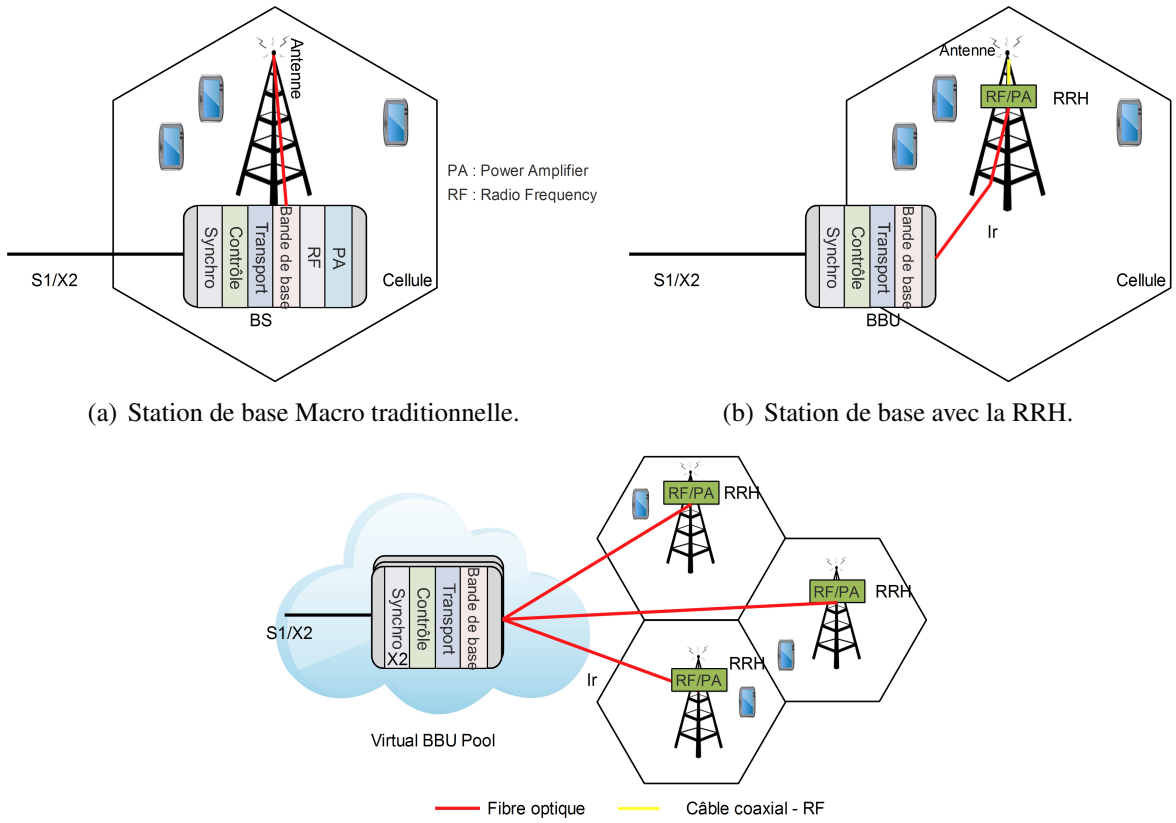
FIGURE 4.1 – Gain de multiplexage statistique de l'architecture C-RAN pour les réseaux mobiles [4].

l'amplification et le filtrage [80]. La partie responsable du processus de traitement du signal en bande de base est appelée BBU (Base Band Unit) [34]. Cette architecture a été introduite au début du déploiement de la 3G mais actuellement, elle a été adoptée pour la plupart des stations de base [4].

Dans le déploiement fait le plus souvent par les opérateurs, la BBU est à quelques dizaines de mètre de la RRH. Cependant, la distance entre une RRH et une BBU pourrait être étendue jusqu'à 40 km. Cette distance est limitée par les délais introduits par les temps de traitements et de propagation. Selon cette architecture, la BBU est placée dans un endroit plus convenable et facilement accessible. Par conséquent, cela permet d'économiser les coûts de location des sites et de maintenances par comparaison à l'architecture réseau d'accès radio (RAN) traditionnelle. Les RRHs peuvent être placés sur des poteaux ou des toits ce qui entraîne un refroidissement efficace économisant l'énergie de l'air conditionné.

Le Common Public Radio Interface (CPRI) [81] est le protocole d'interface radio largement utilisé pour la transmission de données en phase / quadrature (IQ) entre les RRHs et les BBUs sur l'interface Ir. C'est un protocole bidirectionnel qui nécessite une synchronisation précise et un contrôle strict de la latence. Il existe d'autres protocoles qui peuvent être utilisés telles que le OBSAI (Open Base Station Architecture Initiative) [82] et Open Radio Equipment Interface (ORI) [83, 84]. Pour le système LTE, l'interface X2 est définie entre les stations de base tandis que l'interface S1 connecte la station de base avec le cœur du réseau mobile [4].

4.2.3 Architecture des stations de base basées sur le C-RAN



(a) Station de base Macro traditionnelle.

(b) Station de base avec la RRH.

(c) C-RAN avec les RRHs.

FIGURE 4.2 – Évolution de l'architecture des stations de base [4].

Afin d'optimiser l'utilisation de chaque BBU entre les stations de base fortement et faiblement chargées, les BBUs sont centralisées en une entité centrale appelée BBU pool. La BBU pool est partagée par plusieurs RRHs c'est illustré par la figure 4.2(c). La BBU pool est un cluster constitué par des processeurs ordinaires effectuant le traitement du signal en bande de base (PHY / MAC). Dans ce contexte, nous retrouvons l'interface X2 sous une nouvelle forme, souvent appelée X2 +. Cette dernière a pour rôle d'organiser la communication inter-cluster ainsi que la communication vers d'autres pools [4]. Les BBUs peuvent tourner sur des machines virtuelles qui peuvent être lancé dynamiquement. Dans ce cas, on parle de Virtualized-RAN (V-RAN).

En fait, le concept de C-RAN a été introduit par IBM [85] sous le nom Wireless Network Cloud (WNC) et s'appuie sur un concept distribué de système de communication sans fil [86]. Dans [86], Zhou propose une architecture de réseau mobile dans laquelle un utilisateur communique avec plusieurs antennes distribuées et placées d'une manière dense. Dans ce réseau, le

signal est traité par des centres de traitement distribués (DPCs : Distributed Processing Centers). Le terme C-RAN est utilisé pour décrire cette architecture, où la lettre C peut être interprétée comme : Cloud, Traitement centralisé (Centralized Processing), Radio Coopérative ou Collaborative [4].

La figure 4.3 montre un exemple de réseau mobile LTE basée sur l'architecture C-RAN. La partie fronthaul du réseau s'étend des sites RRHs à la BBU pool. Le backhaul relie la BBU Pool au cœur du réseau mobile. Les RRHs situées sur des sites distants sont situées au même endroit que les antennes. De plus, elles sont connectées aux processeurs très performants de la BBU pool via des liaisons de transport optiques caractérisées par une faible latence et une large bande passante. Le signal numérique en bande de base (les échantillons IQ) est transmis entre les RRHs et les BBUs [4].

Le tableau 4.1[4] compare l'architecture traditionnelle des stations de base, les stations de base avec les RRHs et l'architecture C-RAN.

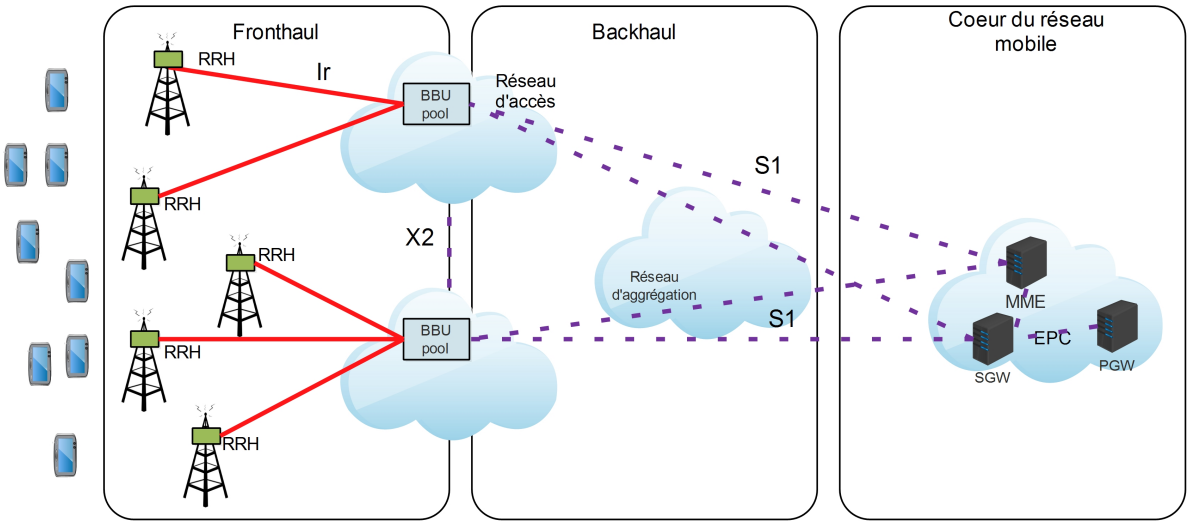


FIGURE 4.3 – Architecture C-RAN du réseau mobile LTE [4]

4.3 Les avantages du C-RAN

Les cellules macros ainsi que les petites cellules peuvent bénéficier de l'architecture C-RAN. Pour le déploiement des stations de base macro, la BBU pool centralisée permet une utilisation plus efficace des BBUs réduisant à la fois le coût du déploiement et de l'exploitation des stations de base. Cette architecture réduit également la consommation énergétique, offre une grande flexibilité dans les mises à niveau du réseau et enfin, il adapte le réseau au trafic

TABLE 4.1 – Comparaison entre l'architecture traditionnelle des stations de base, les stations de base avec les RRHs et l'architecture C-RAN [4].

Architecture	**Fonctionnalités radios et de traitement en bande de base**	**Le problème soulevé**	**Le problème causé**
Station de base traditionnelle	Co-localisés dans la même unité	-	Consommation énergétique élevée. Les ressources sont sous-utilisées
Station de base avec RRH	Partagés enre la RRH et le BBU. La RRH est placée avec les antennes dans des sites distants. Les BBUs sont situées à une distance comprise entre 20 Km et 40 Km.	Une consommation énergétique plus faible. Placement plus adéquat des BBUs	Les ressources sont sous-utilisées
C-RAN	Divisés entre la RRH et le BBU. La RRH est placée avec les antennes dans des sites distants. Les BBUs de plusieurs sites sont co-localisées dans la pool à une distance comprise entre 20 Km et 40 Km. Premiers essais et déploiement sur le terrain en 2015	Plus faible consommation énergétique. Plus faible nombre de BBUs. Réduction des coûts	Plus de données à transporter entre les RRHs et les BBUs

non uniforme. En outre, les fonctionnalités avancées du LTE-A, telles que le CoMP et la coordination des interférences, peuvent être efficacement prises en charge par le C-RAN, ce qui est particulièrement essentiel lors du déploiement des petites cellules. Les opérateurs mobiles peuvent offrir aux utilisateurs des services plus attractifs puisque le temps de réponse des serveurs d'applications est sensiblement plus court [87]. Ainsi, les opérateurs du réseau peuvent s'associer avec des développeurs de services tiers afin d'héberger des serveurs en les localisant

dans le cloud (dans le BBU pool) [88]. Dans cette section, les avantages du C-RAN sont décrits et motivés : adaptation au trafic non-uniforme, économies en termes d'énergie et de coûts, amélioration de la capacité et de l'efficacité spectrale. Enfin, nous retrouvons la facilité de mise à niveau et de maintenance du réseau [4].

4.3.1 Adaptation au trafic non-uniforme

Typiquement, au cours d'une journée, les utilisateurs se déplacent entre différentes zones, par exemple, entre régions résidentielles et régions industrielles. La figure 4.4 illustre l'évolution de la charge du réseau pour une journée dans une zone industrielle. Les stations de base sont souvent dimensionnées pour les heures chargées. En fait, lorsque les mobiles passent d'une zone à une autre, une énorme quantité de puissance de traitement est gaspillée dans les régions à partir desquelles les utilisateurs se sont déplacés. En outre, les pics de trafic peuvent être 10 fois plus élevés que pendant les heures creuses [5]. Dans ce contexte, chaque cellule est caractérisée par une distribution quotidienne de trafic variable. De plus, les pics de trafic se produisent à des heures différentes tout au long de chaque journée. Par conséquent, la RRH serveuse peut changer dynamiquement tandis que la BBU serveuse reste dans la même BBU pool. Dans ce cadre, l'allocation de ressources durant ces périodes de surcharge est efficace étant donné que la puissance de traitement, les ressources radios et la mémoire au sein de la pool peuvent être alloués dynamiquement selon les demandes [4].

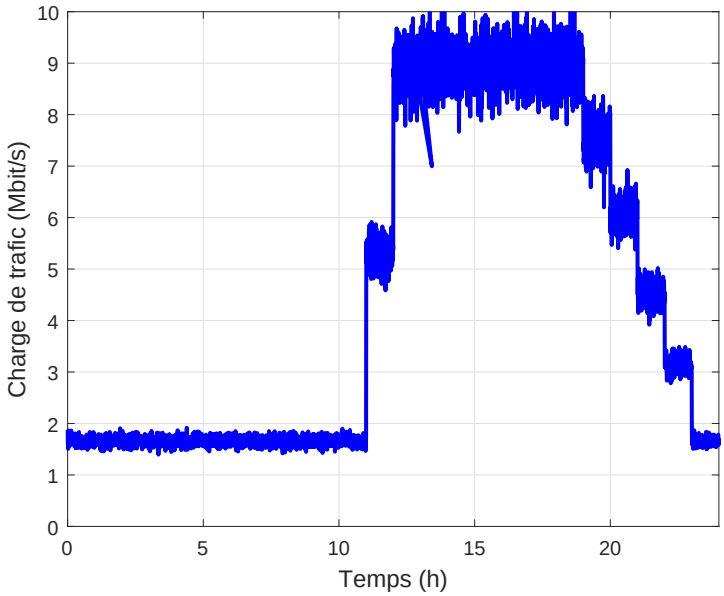


FIGURE 4.4 – Variation de la charge de trafic durant une journée dans une zone industrielle [5]

4.3.2 Économies en termes d'énergie et de coûts

L'architecture C-RAN permet d'avoir un traitement centralisé. Dans ce contexte, le nombre de stations de base peut être divisé dans certain cas par 10. Ainsi, la climatisation et d'autres équipements consommant de l'énergie sur site peuvent être considérablement réduits. Cela se traduit directement par une réduction en termes de coûts d'exploitation et de dépenses d'investissement. En effet, 80% des dépenses d'investissement sont consacrés aux réseaux d'accès radio (RAN) [5]. En plus, l'énergie au sein du réseau mobile est dépensée par les amplificateurs de puissance fournissant aux RRHs et aux BBUs l'électricité et la climatisation. En d'autres termes, l'emploie de l'architecture C-RAN offre un gain potentiel au niveau du coût de l'énergie consommée puisque le nombre de BBU sera réduit par rapport aux réseaux radios mobiles traditionnelles. D'autre part, durant les périodes de sous-charge (par exemple la nuit), quelques BBUs de la pool peuvent être éteintes sans affecter la QoS fournie par le réseau. Enfin, de petites cellules ayant une faible puissance de transmission peuvent être déployées ce qui améliore la couverture et la capacité du réseau [4].

4.3.3 Amélioration de la capacité, de l'efficacité spectrale et diminution des délais

Grâce è l'architecture C-RAN, des stations de base virtuelles (macro ou micro) sont agrégées dans une large BBU pool où, les messages de signalisation, les données et les informations sur les états de liens concernant un grand nombre d'utilisateurs actifs sont partagées. Dans ce contexte, il est plus facile d'implémenter des algorithmes permettant d'atténuer les interférences et d'améliorer l'efficacité spectrale. Par exemple, la coopération multipoint (CoMP pour la LTE-Advanced) peut être implémentée facilement avec l'architecture C-RAN. Enfin, les handovers se dérouleront désormais au sein la BBU pool au lieu des stations de base ce qui réduit considérablement les délais de transfert intercellulaire [4].

4.3.4 Facilité de mise à niveau et de maintenance du réseau

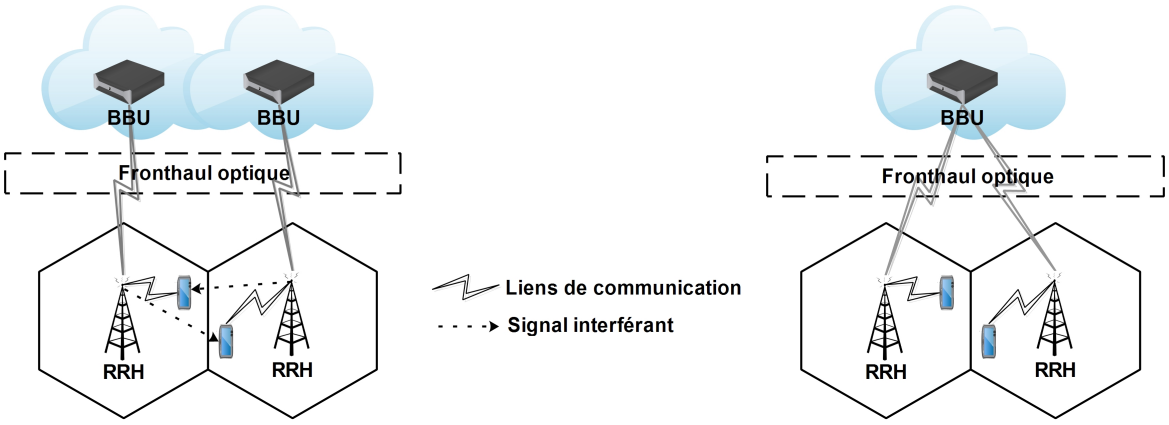
L'architecture C-RAN composée par plusieurs BBUs co-localisées dans le même endroit facilite la maintenance du réseau. En fait, la reconfiguration automatique de la BBU pool permet au réseau d'absorber les pics de trafic et d'éviter les pannes réduisant ainsi les interventions humaines. Cependant, les pannes ainsi que les mises à niveau de point de vue matérielles nécessites toujours une intervention humaines mais seulement pour quelques BBU pool. Par contre, l'architecture RAN traditionnelle requiert des interventions humaines dans tous les sites du réseau radio. Le C-RAN combiné avec une pool de BBU virtuelle facilite l'implémenta-

tion de nouveaux standards. En effet, les besoins en termes de ressources matérielles peuvent être placés dans des endroits centralisés. Par conséquent, le déploiement est donc considéré par les opérateurs comme faisant partie de leur stratégie de migration. De plus, l'intégration de l'architecture SDN (Software Defined Network) [89] avec le C-RAN introduit de nouvelles applications ainsi qu'une certaine intelligence au réseau. Enfin, cette architecture facilite intrinsèquement la conception de topologies réseaux flexibles [4].

4.4 Contribution : adaptation dynamique des stratégies d'association entre RRHs et BBUs

4.4.1 Contexte

Selon l'architecture C-RAN, les BBUs sont localisées dans la BBU pool dans le but d'assurer une gestion centralisée des RRHs. De plus, ces BBUs sont séparées physiquement des RRHs. Ainsi, une BBU est associé à une seule RRH. Avec ce mode de configuration du lien fronthaul appelé en anglais « one-to-one mapping » (figure 4.5(a)), une seule BBU génère (reçoit) un signal unique pour (de la part) une seule RRH. Dans ce contexte, les ressources radios de chaque BBU sont dédiées exclusivement aux utilisateurs d'un seul RRH. De ce fait, cette configuration n'est pas efficace du point de vue consommation énergétique et taux d'utilisation des ressources fréquentielles particulièrement dans le cas d'un réseau sous-chargé. Puisque le spectre est réutilisé par toutes les RRHs, cela introduit de hauts niveaux d'interférences intercellulaires notamment pour les utilisateurs frontaliers.



(a) Association One-to-one. (b) Association One-to-many.

FIGURE 4.5 – Les schémas d'association entre les BBUs et les RRHs.

L'architecture C-RAN a modifié ce concept en se basant sur le regroupement (clustering) des RRHs permettant d'atteindre un certain gain de multiplexage statistique. En fait, ce mode de configuration du fronthaul consiste à assigner une BBU à un groupe (cluster) de plusieurs RRHs de sorte que les ressources radios soient partagées par leurs utilisateurs associés (figure 4.5(b)). Cette stratégie de transmission est appelée « one-to-many mapping » et est constituée d'un cluster contenant plusieurs cellules. En fait, les RRHs associées au même cluster collaborent pour former une seule cellule. Par conséquent, cette technique assure une gestion plus efficace de la mobilité puisque les utilisateurs seront affectés à un même BBU. Comme la consommation énergétique est proportionnelle au nombre de ressources radios utilisées, le schéma de transmission one-to-many réduit la consommation énergétique du réseau. De plus, cela améliore l'utilisation des ressources et augmente la qualité du signal puisque l'interférence intra-cluster est supprimée. Cependant, cette architecture n'est optimale que si les ressources de traitement ainsi que les ressources radios de la BBU sont suffisantes pour répondre aux besoins utilisateurs.

Les auteurs de [90] ont traité et formulé le clustering des RRHs comme un problème algorithmique de bin packing. De plus, ils ont introduit une première solution basée sur une heuristique et une autre technique optimale. Ceci est dans le but de réduire le nombre de BBUs actifs et de diminuer la puissance consommée sans compromettre la QoS des utilisateurs. Seulement les cellules adjacentes sont autorisées à former un cluster de sorte à réduire la fréquence des handovers. Le clustering des RRHs a été exprimé dans [24] comme un jeu consistant à former des coalitions : des clusters disjoints sont formés de sorte à maximiser une fonction d'utilité définie par les paramètres du réseau. Cette fonction reflète les performances du réseau en termes de débit, de puissance consommée et de fréquence de handover. Dans ce contexte, une approche centralisée et une autre distribuée sont introduites. Les auteurs ont montré que leur solution distribuée permet d'atteindre des performances proches de ceux de l'approche centralisée. De plus, la technique distribuée réduit considérablement le nombre d'itérations nécessaires pour le processus de clustering. Cependant, ces algorithmes de clustering sont caractérisés par une grande complexité. En outre, la majorité des approches permettant l'association entre BBUs et RRHs présentent dans la littérature [90, 24, 91, 92] ne sont pas adaptées aux scénarios réalistes dans lesquels les mobiles ont une demande de trafic variable et dynamique. En réalité, ils ont formulé les stratégies de clustering des RRHs en considérant un modèle de trafic de type full buffer. Ce dernier ne prend pas en considération la dynamicité du trafic.

Dans cette thèse, nous avons proposé une nouvelle technique intelligente basée sur l'hypothèse d'un fronthaul logiquement reconfigurable afin d'augmenter les performances des systèmes C-RAN. Ainsi, nos principales contributions dans le cadre du C-RAN se résument comme suit :

- Nous avons introduit une nouvelle approche hybride qui consiste à découper les unités de ressources de chaque trame en deux tranches : La première est allouée aux utilisateurs du centre de chaque RRH selon une association one-to-one et permet d'augmenter le débit fourni. En réalité, cette tranche est réutilisée par la région centrale de chaque RRH étant donné que les utilisateurs centraux possèdent un bon SINR. La deuxième tranche sera allouée aux utilisateurs frontaliers et mobiles selon l'approche one-to-many. Ceci permet de réduire à la fois les interférences intercellulaires et la fréquence des handovers. Ainsi, l'idée derrière cette solution est de s'approcher des performances des deux modes de configuration du fronthaul, particulièrement pour une charge de trafic modérée.
- Nous avons aussi proposé un algorithme intelligent destiné à être implémenté dans la BBU pool pour déterminer la stratégie de transmission optimale (i.e. one-to-one, one-to-many ou hybride) et ce en se basant sur le taux d'utilisation globale des ressources radios. En d'autres termes, notre solution s'adapte à la charge de trafic du réseau. En fait, elle profite à la fois des avantages du mapping one-to-many à faible charge et de l'association one-to-one à haute charge de trafic.

4.4.2 La solution proposée

4.4.2.1 Modèle du C-RAN

La stratégie de transmission de l'interface radio se base toujours sur l'OFDM de telle sorte que la bande passante soit partagée en N sous-bandes. Dans le domaine temporel, les ressources fréquentielles sont divisées en trames constituées par des intervalles de temps (time slot) constant et de même durée. Chaque paire de sous-porteuse et de time slot constitue une unité de ressource élémentaire (RU). Notre modèle de C-RAN est constitué par R RRHs (cellules) connectées à la BBU pool au moyen de liens optiques ayant une haute performance au niveau du fronthaul. Nous considérons aussi K utilisateurs distribués à travers le réseau. Dans le sens descendant, les paquets générés du réseau cœur sont stockés au niveau des buffers de la BBU pool qui les renvoient aux utilisateurs à travers les RRHs. Nous supposons que la technique de sélection et/ou extinction dynamique de point de transmission (Dynamic Transmission Point Selection DPS) [93] est implémentée dans la BBU pool de sorte que chaque utilisateur puisse reçevoir ses données à partir d'une seule RRH à la fois. L'ordonnanceur est situé au niveau de la couche MAC de la BBU et assure la gestion des buffers selon une approche centralisée. Dans ce travail, nous avons choisi le Proportional Fair (PF).

La trame générée par chaque BBU est composée par N_{RU} unités de ressources. Dans le cas de la configuration one-to-one, chaque RRH est associée à une BBU. Les utilisateurs dans le

voisinage de chaque RRH sont donc ordonnancés dans différentes trames. Dans la figure 4.6, les utilisateurs UE 1, UE 2 et UE 3 appartiennent à la RRH *i* tandis que la RRH *j* contient le reste des mobiles (UE 4, UE 5 et UE 6). Dans ce contexte, toute la bande est allouée à chaque RRH et le spectre est réutilisé par chaque cellule. Pour l'association one-to-many, tous les utilisateurs de toutes les RRHs se partagent les mêmes unités de ressources d'une seule BBU : ils sont ordonnancés et multiplexés dans la même trame. Dans la figure 4.7 nous schématisons ce dernier mode où chaque unité de ressource de chaque RRH est représentée par une couleur différente. En fait, nous considérons un ordonnancement conjoint des utilisateurs des deux RRHs dans une même trame générée par la même BBU.

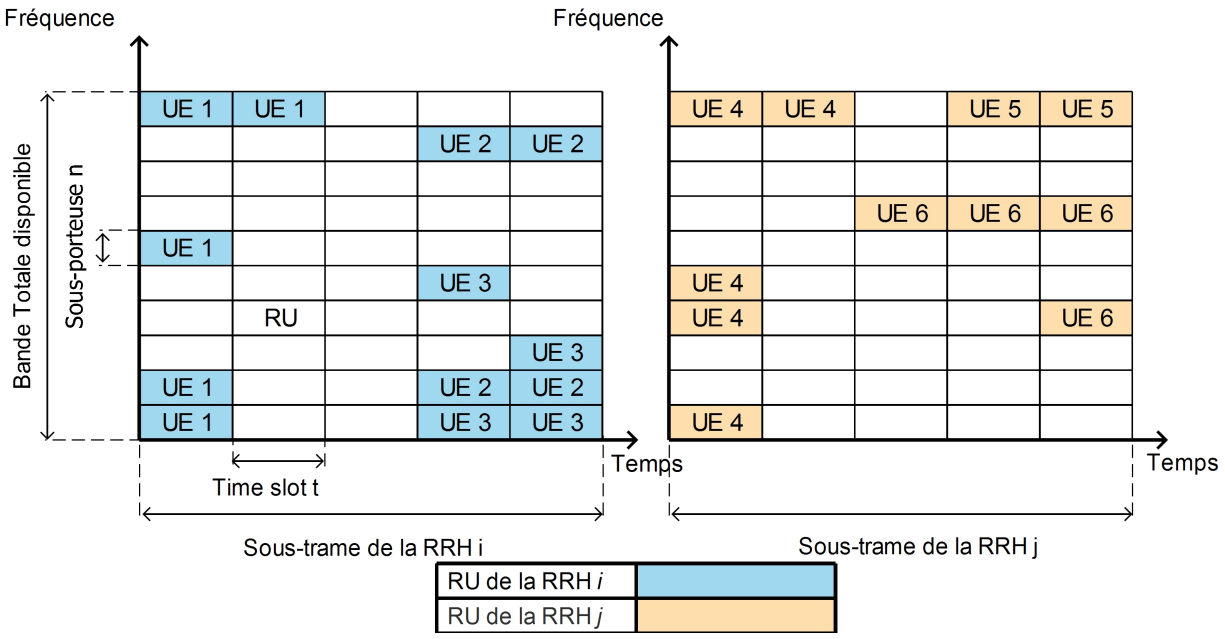


FIGURE 4.6 – Structure de la trame du mode one-to-one.

4.4.2.2 Approche basée sur le concept de tranche (network slicing)

D'une part, l'association logique one-to-one est bien adaptée aux utilisateurs statiques ayant un profil de charge de trafic élevé. D'autre part, la configuration one-to-many est plus adaptée aux scénarios faiblement chargée et supporte efficacement la mobilité des utilisateurs. Dans le but de bénéficier des avantages de ces deux stratégies de transmission, nous introduisons un mode de configuration hybride. Ainsi, notre solution est motivée par le concept du Network Slicing [94]. En fait, nous supposons que les unités de ressources de chaque trame sont divisées en deux tranches. Aussi, les utilisateurs sont classifiés en deux groupes : le premier contient les utilisateurs centraux (CCU) tandis que le second est constitué par les utilisateurs frontaliers (CEU) et mobiles (MU). En fait, la première tranche de la trame est exclusivement dédiée aux

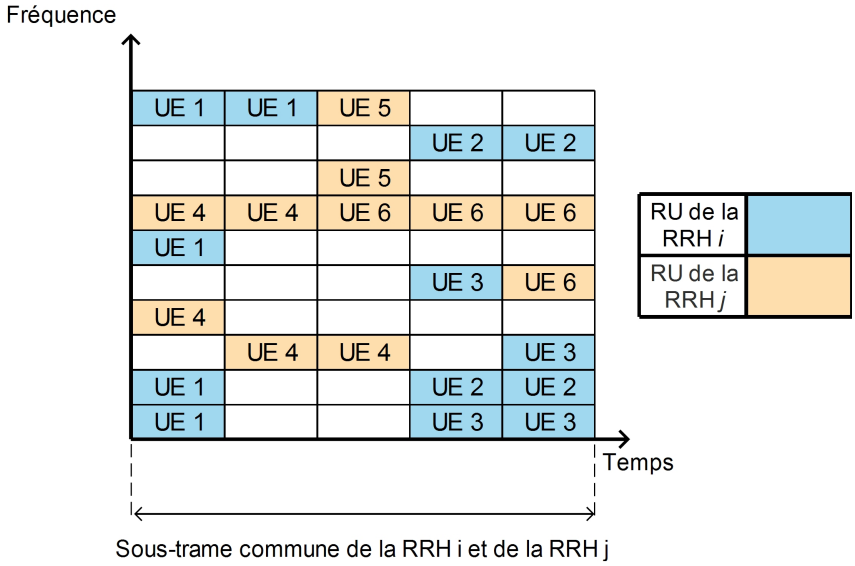


FIGURE 4.7 – Structure de la trame du mode one-to-many : ordonnancement conjoint de RUs et de RRHs.

utilisateurs centraux des RRHs. Cette tranche de trame est générée séparément par chaque BBU associée à chaque RRH et est transmise selon l'association one-to-one. Ceci permet d'augmenter le débit fournit particulièrement à haute charge de trafic. La seconde tranche est composée par un nombre d'unités de ressources alloués à tous les utilisateurs frontaliers et mobiles du cluster. Cette quantité d'unité de ressource constitue une partie commune de la trame et est générée pour les RRHs selon l'association one-to-many. Ceci permet de réduire les interférences intercellulaires. Aussi, notre solution permet de supporter plus efficacement la mobilité des utilisateurs. Pour illustrer cette méthode, dans la figure 4.8, nous représentons la structure de la trame hybride. Comme la technique DPS est implémentée dans la BBU pool, chaque RRH transmet uniquement les unités de ressources de ses utilisateurs associés. Cela explique pourquoi les ressources allouées aux utilisateurs appartenant à une autre RRH sont verrouillées au niveau de la tranche partagée (représentée par la partie hachurée de la figure 4.8).

La répartition entre les deux tranches dépend fortement du nombre d'utilisateurs dans les deux groupes. Dans notre travail, nous supposons que pour une trame OFDM, les unités de ressources sont divisées comme ce qui suit :

$$N_{\mathrm{RUsh}} = \lfloor \left(\frac{K_{\mathrm{e}} + K_{\mathrm{m}}}{K} \right) N_{\mathrm{RU}} \rfloor, \tag{4.1}$$

$$N_{\mathrm{RUunsh}} = N_{\mathrm{RU}} - N_{\mathrm{RUsh}}, \tag{4.2}$$

avec N_{RU} le nombre total de RU dans la trame générée par une seule BBU, N_{RUsh} représente

le nombre de RU partagées, N_{RUunsh} est le nombre de RU non partagées, K_{e} est le nombre d'utilisateurs frontaliers et K_{m} est le nombre d'utilisateurs mobiles.

D'après la configuration hybride de la trame, les utilisateurs centraux souffrent d'un haut niveau d'interférence par comparaison à ceux de l'association one-to-many. Dans ce contexte, il serait clair qu'à faible charge de trafic, le système one-to-many fournit une meilleure QoS que la configuration hybride et ce pour les utilisateurs centraux. De plus, selon l'association one-to-one, le spectre est réutilisé par chaque BBU et donc, cela génère un haut niveau d'interférence surtout pour les utilisateurs frontaliers. Dans ce cas, la solution hybride est plus intéressante que la configuration one-to-one (à faible charge de trafic). De plus, l'association one-to-one consomme plus d'énergie que le mode hybride et le mode one-to-many. En effet, plus d'unités de ressources sont utilisées et donc, plus de BBUs sont actives. Ceci conduit donc à la diminution de l'efficacité énergétique. Cependant, pour une charge de trafic extrêmement haute et pour des utilisateurs statiques, l'association one-to-one offre une meilleure QoS que les deux autres solutions au prix d'une haute consommation énergétique. En fait, plus d'unité de ressources sont disponibles et par conséquent, le système C-RAN offre un haut débit.

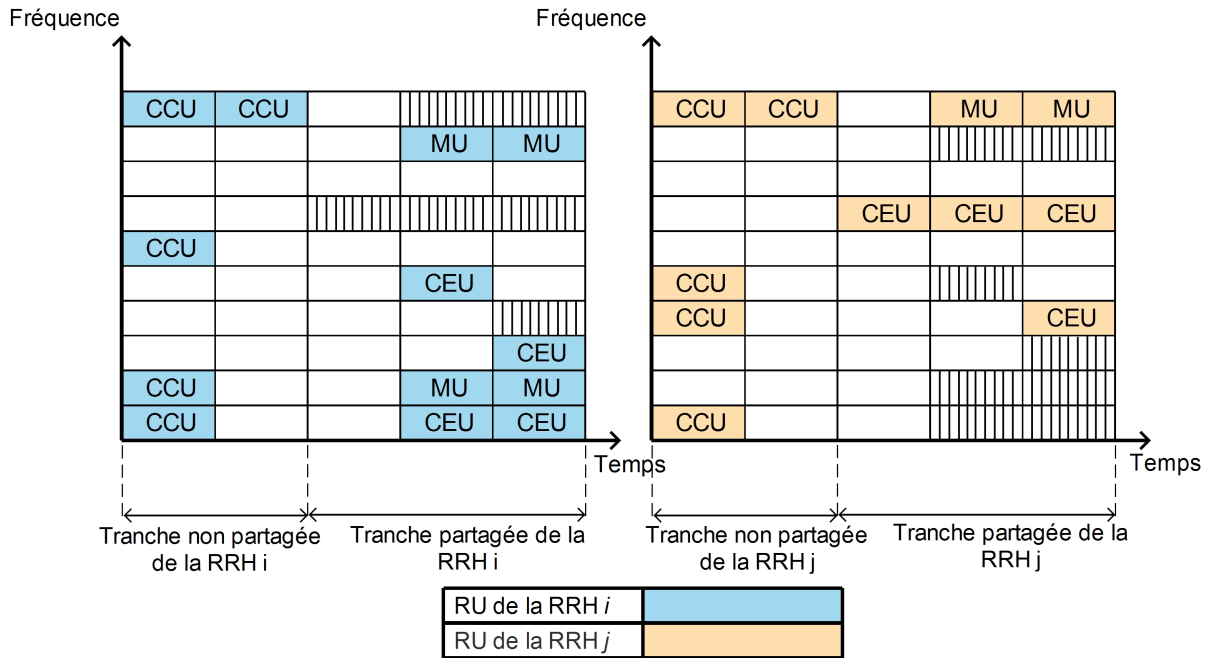


FIGURE 4.8 – Structure de la trame hybride.

4.4.2.3 Stratégie de transmission dynamique

Dans le but d'adapter notre solution à une distribution non-uniforme de la charge de trafic ainsi qu'à la mobilité des utilisateurs tout en réduisant la consommation énergétique, nous

proposons d'implémenter un contrôleur intelligent dans la BBU pool. L'objectif est de reconfigurer dynamiquement le schéma d'association entre les BBUs et les RRHs. En fait, cette entité consiste à fixer la stratégie de transmission appropriée (i.e., one-to-many, hybride et one-to-one) qui satisfait la demande des utilisateurs en termes de débit. Ainsi, elle emploie un algorithme dynamique et efficace pour déterminer la meilleure stratégie de transmission. Cette dernière offre un bon compromis entre la QoS fournie, la puissance consommée et la fréquence des handover.

La solution proposée est donnée par l'algorithme 3 où RW_{used} représente le ratio des ressources radios utilisés par les BBUs. Ce paramètre dépend du mode d'association actuellement actif entre BBUs et RRHs.

- Dans le cas de l'association one-to-one, chaque BBU actif calcule son propre ratio de ressource radio qu'elle utilise. Ce ratio est défini comme étant le nombre total d'unité de ressource allouée par l'ordonnanceur divisé par le nombre total d'unité de ressource. Nous considérons par la suite la plus petite valeur.

- Dans le cas de la configuration one-to-many, nous considérons le ratio d'utilisation des ressources radios d'un seul BBU associé au cluster des RRHs considérées.

- Dans le cas de la configuration hybride, il correspond au ratio de ressources radios utilisées par la tranche partagée (figure 4.8). En fait, nous considérons le ratio de ressources utilisées divisé par le nombre total de ressource dans la tranche partagée.

Enfin, les paramètres seuils RW_1 et RW_2 sont ajustées afin d'optimiser notre algorithme dynamique. Ces derniers reflètent directement la charge de trafic du réseau. Une grande valeur RW_1 entraîne plus de ressources partagées entre les RRHs et par la suite, à une plus faible puissance consommée. Cependant, un faible RW_2 engendre plus de réutilisation de ressources mais aussi, un haut niveau d'interférence typiquement à la frontière de la cellule.

Algorithme 3 Algorithme dynamique d'associaion entre BBUs et RRHs

1: **BEGIN**
2: rafraîchir (RW_{used})
3: **if** ($RW_{\text{used}} \leq RW_1$) **then**
4: Fixer l'association one-to-many comme stratégie de transmission
5: **else if** ($RW_1 < RW_{\text{used}} \leq RW_2$) **then**
6: Fixer le mode hybride comme stratégie de transmission
7: **else**
8: Fixer l'association one-to-one comme stratégie de transmission
9: **end if**
10: Ordonnancer les utilisateurs en se basant sur la stratégie sélectionnée.
11: **END**

4.4.3 Évaluation de performances

4.4.3.1 Modèle du canal

Les RRHs sont équippées par des antennes omnidirectionnelles installées au centre de chaque cellule hexagonale. Le gain du canal $G^i_{k,n}$ entre la RRH serveuse i et l'utilisateur k sur la sous-porteuse n est donné par :

$$G^i_{k,n} = h \times 10^{\frac{X\sigma}{10}} \times \left(\frac{d_0}{d_{k,i}}\right)^{\alpha}. \tag{4.3}$$

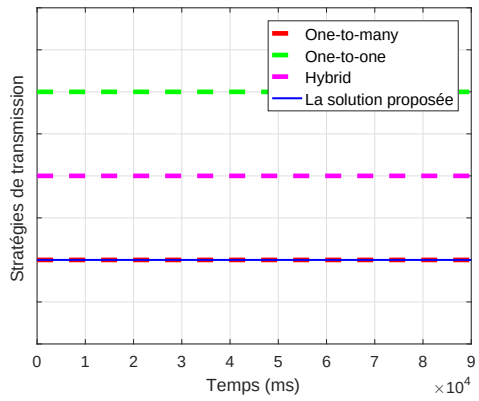
h représente les atténuations multi-trajets de Rayleigh modélisées par une distribution exponentielle, X est une variable aléatoire gaussienne standard, σ est la déviation standard du shadowing en dB, $d_{k,i}$ est la distance entre l'utilisateur K et la RRH i, d_0 est la distance de référence et α est l'exposant du path loss.
Nous supposons que la RRH i appartient à un cluster formé par un ensemble C de RRHs associées au même BBU. Nous dénotons par C' l'ensemble des L RRHs adjacents au cluster C ($C \cap C' = \emptyset$). Dans ce contexte, tous les signaux interférents dans la RRH i ont pour origine les RRHs appartenant au cluster C' puisqu'ils sont associés à de différentes BBUs. Par conséquent, le SINR d'un utilisateur k sur la sous-porteuse n associée à la RRH i est donné par :

$$\gamma^i_{k,n} = \frac{P^i_n G^i_{k,n}}{B_{\text{sub}} N_0 + \sum\limits_{j=1, j\in C'}^{L} P^j_n G^j_{k,n}}, \tag{4.4}$$

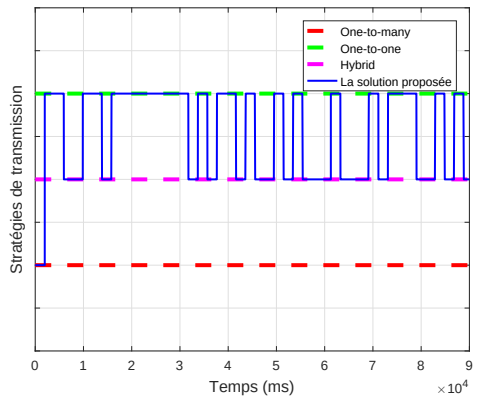
avec P^i_n et P^j_n sont respectivement la puissance de transmission sur la sous-porteuse n de la RRH i et la puissance de transmission sur la sous-porteuse n de la RRH interférente j qui appartient au cluster C'. Aussi, $G^j_{k,n}$ est le gain du canal entre l'utilisateur k et la RRH j, le paramètre N_0 est la densité de puissance du bruit thermique et B_{sub} représente l'espacement entre les sous-porteuses. Enfin, nous avons utilisé la même méthode du chapitre précédent pour le calcul du nombre de bits qui pourraient être transmis par sous-porteuses.

4.4.3.2 Scénario de simulation

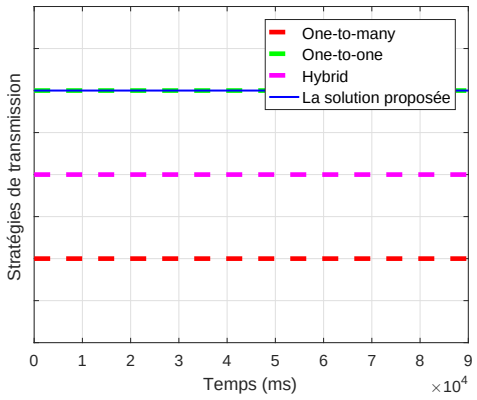
Pour illustrer, nous considérons un petit réseau constitué par deux cellules hexagonales entourées par 8 autres voisines. Pour l'association one-to-many, nous supposons que les deux RRHs considérées collaborent dans le but de former des clusters indépendants. Les utilisateurs sont uniformément distribués en trois groupes selon leurs profils : le premier contient les utilisateurs centraux ayant une distance par rapport à leurs RRHs respectives inférieure au rayon



(a) Stratégies de transmission pour 12 utilisateurs.



(b) Stratégies de transmission pour 30 utilisateurs.



(c) Stratégies de transmission pour 48 utilisateurs.

FIGURE 4.9 – Variation temporelle de la solution proposée entre les différentes stratégies de transmission.

intérieure de la cellule. Le second groupe est constitué par les utilisateurs frontaliers tandis que le dernier représente les utilisateurs mobiles supposés avoir une vitesse fixe. De plus, les utilisateurs mobiles possèdent une trajectoire perpendiculaire à la ligne droite qui sépare les deux cellules centrales [4] (figure 4.5). Nous considérons aussi que ces utilisateurs font des mouvements d'aller et retour entre les extrémités du cluster.

Tous les clients utilisent le même type d'application temps réel produisant de hauts pics de débit sporadique avec des contraintes de délais strictes. Cela a pour effet la complication de la tâche de l'ordonnanceur. En fait, l'étude des stratégies d'allocation de ressources avec des trafics à temps réel influe fortement sur les performances du système par comparaison au modèle full buffer (où les buffers sont supposés être toujours remplis). Aussi, nous supposons que chaque utilisateur possède un seul flux composé par un trafic vidéo MPEG-4 [57]. Ce type de trafic

4. Nous adoptons un modèle hexagonale pour représenter les cellules

très réaliste et complexe crée un haut volume de donnée ayant une haute sporadicité. Ces hauts pics de débit affectent grandement les performances du système en remplissant brutalement les buffers durant de brefs périodes de temps. Le débit moyen par utilisateur sera fixé à 150 kbps.

Pour une première simulation, chaque RRH des deux cellules adjacentes cibles contient 6 utilisateurs uniformément répartis entre les trois groupes. Nous augmentons ensuite successivement le nombre d'utilisateurs par groupe dans les deux RRH. Par conséquent, à chaque exécution de la simulation, six utilisateurs sont ajoutés au réseau (3 par cellule). Enfin, les paramètres seuils RW_1 et RW_2 sont respectivement fixés à 0.7 et 0.9. Pour ce travail, ils sont considérés comme des paramètres statiques, mais pour de futurs travaux, ils peuvent être déterminés de manière optimale afin de répondre aux objectifs de l'opérateur. Le reste des paramètres de simulation sont listés dans le tableau 4.2.

4.4.3.3 Métriques d'évaluation de performances

Pour l'évaluation de performances, nous considérons le retard moyen des paquets comme dans nos autres contributions. De plus, pour ce travail, nous étudions la puissance consommée par le cloud ainsi que le nombre de handover et qui sont définis comme suit :

- La puissance consommée par les BBUs associées à un cluster de RRHs est une fonction linéaire du nombre d'unités de ressources utilisés par chaque BBU. La puissance consommée est donnée par :

$$PC = \lambda + \mu.RU(b,n), \tag{4.5}$$

  avec λ la quantité minimale de puissance consommée par une BBU active (à zéro charge), μ représente le coefficient de variation de la puissance consommée comme une fonction de RU(b,n). La fonction RU(b,n) donne l'utilisation des ressources de la BBU et est exprimée par :

$$RU(b,n) = N_{\text{RUsh}}.1 + (N_{\text{RU}} - N_{\text{RUsh}}).n. \tag{4.6}$$

  Le paramètre N_{RU} est le nombre total d'unité de resource par trame, n est le nombre de RRHs dans le cluster et N_{RUsh} est le nombre d'unités de ressource partagées.

- Les handovers surchargent excessivement le réseau en termes de messages de signalisation tout en réduisant ses performances. Ainsi, il est essentiel de considérer ce paramètre dans notre modèle de simulation. Dans ce contexte, nous supposons que les handovers sont déclenchés en se basant sur la distance entre le mobile et la RRH à laquelle il est rattaché : pour notre cas, le mobile est toujours associé à la RRH la plus proche. Dans

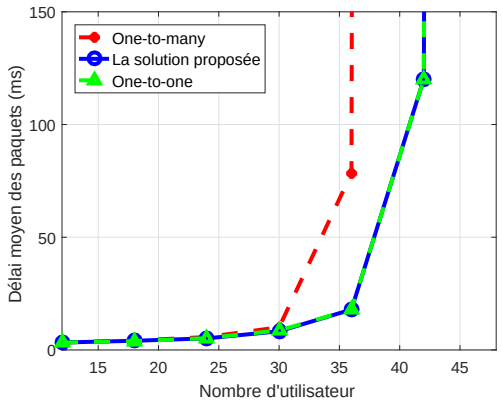
ce travail, nous avons adopté le nombre global de handover comme métrique. En fait, ce paramètre correspond au nombre de fois qu'un utilisateur traverse la bordure entre les deux RRHs cibles quand la stratégie de transmission one-to-one est active.

TABLE 4.2 – Paramètres de la simulation.

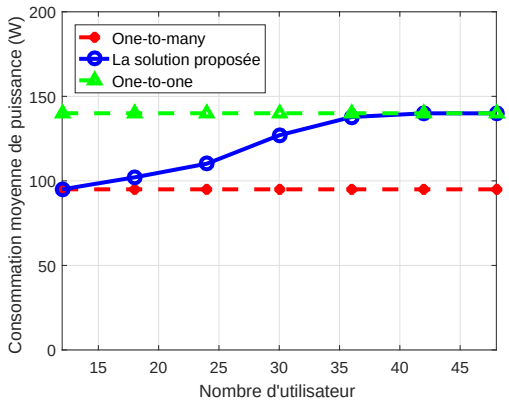
Paramètres	**Valeur**
Nombre de RRHs	10
Rayon de la cellule (R)	500 m
Rayon intérieur	$2R/3$
Nombre de sous-porteuses	75
Puissance de transmission de la RRH	20 W (43 dBm)
Déviation standard du shadowing	σ = 8dB
Distance de référence (d_0)	1km
Exposant du path loss	3.5 (urban area)
BER cible	5×10^{-5}
Espacement entre les sous-porteuses	15 kHz
Densité de puissance du bruit thermique (N_0)	-174 dBm/Hz
RW_1	0.7
RW_2	0.9
λ	50 W
μ	0.6

4.4.3.4 Résultats

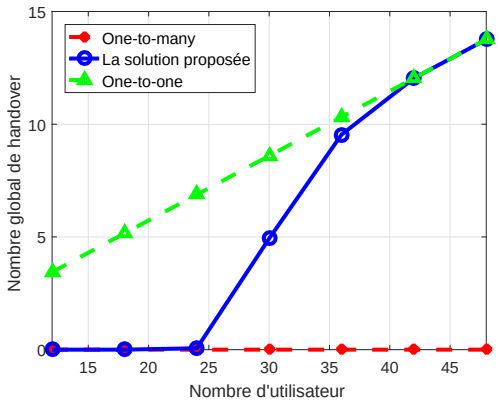
La figure 4.9 montre les variations des stratégies de transmission comme une fonction temporelle pour un système C-RAN sous-chargé avec 12 utilisateurs (figure 4.9(a)), un système moyennement chargé avec 30 utilisateurs (figure 4.9(b)) et pour un autre en surcharge avec 48 mobiles (figure 4.9(c)). Comme nous pouvons voir, la solution proposée emploie l'association one-to-many à faible concentration d'utilisateurs. Ceci est dans le but de réduire la puissance consommée puisque la moitié des BBUs sont utilisées. Pour une concentration d'utilisateurs modérée, notre proposition bascule entre les configurations hybride et one-to-one vue que les



(a) Délai moyen des paquets des utilisateurs.



(b) Consommation moyenne de puissance.



(c) Nombre globale de handover.

FIGURE 4.10 – Résultats de l'évaluation de performances.

utilisateurs sont caractérisés par un trafic dynamique et variable. Enfin, pour une grande concentration de mobiles, notre technique configure le schéma de transmission comme l'association logique one-to-one afin de répondre aux besoins des utilisateurs en termes de ressources radios.

Dans la figure 4.10(a), nous représentons le délai moyen des paquets des utilisateurs dans les deux cellules adjacentes en fonction du nombre d'utilisateurs. Pour la simplicité, dans ce travail nous ne prenons pas en compte l'impact des handovers en calculant le délai des utilisateurs mobiles. Par conséquent, les résultats que nous montrons sont optimistes pour la configuration one-to-one. Nous remarquons que toutes les solutions fournissent approximativement les mêmes résultats quand le réseau est en sous-charge. Cependant, l'association one-to-one atteint les pires résultats dès que le nombre d'utilisateurs augmente. En effet, tous ces derniers sont multiplexés dans la même trame et donc, le nombre de ressources disponibles pour les servir devient insuffisant. Notre technique atteint les résultats de l'association one-to-one quel que soit le nombre d'utilisateurs.

La figure 4.10(b) représente la puissance moyenne consommée par les BBUs des deux cellules cibles en fonction de la concentration des mobiles. Le schéma one-to-one consiste à assigner une BBU à chaque RRH et consomme plus de ressource que l'approche one-to-many. Par conséquent, ce mode de configuration atteint toujours le même niveau constant de consommation énergétique quel que soit le nombre d'utilisateurs dans le système. La solution que nous proposons a pour but de réduire la consommation de puissance du système C-RAN tout en fournissant une QoS acceptable. Dans ce contexte, quand le nombre d'utilisateurs est faible, elle fournit le même résultat que la configuration one-to-many et surpasse l'association one-to-one. Pour une charge modérée, notre solution emploie plus fréquemment la structure hybride de la trame (figure 4.9(b)) et fourni un compromis entre la réduction de la puissance consommée (figure 4.10(b)) et la QoS (figure 4.10(a)).

La figure 4.10(c) montre le nombre moyen de handovers dans le cluster cible. Comme nous utilisons un simulateur à événements discrets, les résultats dépendent fortement du modèle de mobilité des utilisateurs. L'association one-to-one atteint toujours les pires résultats puisque les RRHs sont associées à différents BBUs. Pour la configuration one-to-many, un utilisateur mobile dans le même cluster appartient toujours à la même BBU et donc, aucun handover n'est établis. Notre technique détermine et ajuste la stratégie de transmission en se basant sur le taux d'utilisation des ressources. Par conséquent, les handovers sont établis seulement quand le mode one-to-one est actif.

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu sur une nouvelle architecture mobile appelée C-RAN ainsi que nous avons présenté ses avantages. Le C-RAN peut réduire considérablement les coûts de déploiement et d'opération du réseau tout en améliorant ses performances en termes de couverture, efficacité énergétique et gestion de la mobilité.

Nous avons étudié de différentes stratégies d'association entre les BBUs et les RRHs pour l'architecture C-RAN. Nous avons introduit un nouveau modèle de configuration hybride de la trame combinée avec un algorithme dynamique afin de déterminer la meilleure stratégie de transmission. Les résultats de la simulation montrent que la solution proposée s'adapte aux différentes conditions de charge de trafic : elle atteint les performances du mode d'association one-to-many à faible charge et ceux de la one-to-one à haute charge.

CHAPITRE 5

CONCLUSION GÉNÉRALE

Sommaire

5.1 Synthèse des contributions **114**

5.2 Perspectives **115**

5.1 Synthèse des contributions

Les travaux effectués dans le cadre de cette thèse se sont intéressés à la gestion des ressources radios aux seins des réseaux sans fil basés sur la technologie OFDM.

Dans le chapitre 1, nous avons exposé quelques notions de bases sur les spécificités des communications sans fil. Plus particulièrement, nous avons mis l'accent sur les contraintes du canal radio mobile, le concept cellulaire, l'interface radio du système LTE. Enfin, dans la dernière partie nous avons parlé des algorithmes d'ordonnancement monocellulaires qui ont pour tâche la gestion optimale des ressources radios afin de maximiser le débit offert et améliorer la QoS.

Dans le chapitre 2, nous avons proposé un nouvel ordonnanceur intercellulaire dans le but d'améliorer les performances des réseaux sans fil actuels et futurs. Notre ordonnanceur exploite les variations spatio-temporelles de la charge de trafic au sein du réseau cellulaire. Il s'agit de sélectionner dynamiquement la cellule la plus chargée pour lui donner plus de ressources fréquentielles de la part de ses cellules voisines qui n'en ont pas besoin. Nous avons proposé deux versions de cet algorithme : la première consiste à aider la cellule qui possède la plus grande charge de trafic et la seconde repose sur une métrique QoS appelée MCPDOR. En fait, nous sommes convaincus que la charge de trafic n'est pas le meilleur critère qu'il faut considérer durant le processus d'allocation de spectre entre cellules. Par conséquent, nous avons démontré à travers la simulation que le MCPDOR permet à l'ordonnanceur intercellulaire de toujours prendre les meilleures décisions en sélectionnant les cellules en difficultés.

D'un autre côté, nous avons proposé le concept de bande passante minimale qui correspond à la quantité minimale de ressources radios que l'ordonnanceur multicellulaire doit assurer à chaque cellule afin qu'elle soit capable de se protéger contre les pics de trafics soudains et irréguliers. Dans ce contexte, un nouvel ordonnanceur multicellulaire a été introduit permettant le calcul opportuniste de ce dernier paramètre en fonction du ratio de bande que consomme chaque cellule ainsi que de la bande totale dont elle dispose.

Ensuite, nous nous somme intéressé dans le chapitre 3 à la gestion des interférences intercellulaire à travers les techniques de coordination des interférences entre les cellules (ICIC). Nous avons effectué une étude quantitative de différentes techniques d'allocation du spectre entre les cellules. Nous avons aussi proposé une solution dynamique et autonome permettant d'adapter les sous-bandes ICIC à la répartition non-uniforme des utilisateurs au sein du réseau cellulaire.

Enfin, dans le chapitre 4, nous avons mené des études sur les réseaux radios basés sur l'architecture C-RAN. Dans ce cadre, nous avons proposé un nouveau mode d'association entre les RRHs et les BBUs. Il s'agit d'un mode hybride dans lequel les ressources radios de chaque trame sont partagées en deux tranches afin de les allouer différemment au deux groupes d'utili-

sateurs : le premier contient les utilisateurs centraux auxquels leurs sont alloués les ressources selon l'association one-to-one et le second est constitué par les utilisateurs mobiles et frontaliers qui se partagent les mêmes ressources selon le mode one-to-many.

5.2 Perspectives

Les contributions réalisées dans le cadre de cette thèse ouvrent la voie à de nouvelles perspectives prometteuses permettant une gestion opportuniste des ressources radios aux seins des réseaux cellulaires. Dans ce cadre, nous donnons un aperçu sur des problématiques qui n'ont pas été traitées durant cette thèse et qui peuvent faire l'objet d'un travail futur.

- Jusqu'à maintenant, nous n'avons concentré notre étude que sur les réseaux homogènes où on suppose que le réseau cellulaire est composé de macros cellules ayant une même puissance de transmission. Cependant, un tel réseau dégrade la qualité de transmission surtout pour les utilisateurs frontaliers ce qui détériore la capacité du système. Dans le but d'augmenter la zone de couverture des cellules tout en améliorant la QoS des utilisateurs situés aux bordures, les réseaux cellulaires hétérogènes ont été déployés (HetNet). Ainsi, un réseau HetNet à deux tiers comprend une station macro au premier tiers superposée avec une autre station de base (femto ou pico cellule) moins complexe, émettant à faible puissance et ayant une faible portée. Vu que la zone de couverture de la femto cellule est plus petite, elle peut réutiliser plusieurs fois la même bande de fréquence licenciée de la macro cellule ce qui améliore l'efficacité spectrale et la capacité du réseau. Cependant, cela ajoute des scénarios d'interférences supplémentaires. En effet, la cellule macro va générer une forte interférence pour la cellule femto ce qui limite son rayon de couverture. D'autre part, la cellule femto cause à son tour un trou de couverture pour les utilisateurs de la macro cellule située à sa proximité et ne pouvant s'y connecter. Dans ce contexte, nous envisageons de proposer une solution qui coordonne la puissance de transmission entre les cellules voisines afin de réduire les interférences intercellulaires. Le principe consiste à réduire la puissance de transmission sur certaines unités de ressources transmises par les cellules interférentes tout en exploitant les variations dynamiques de la charge de trafic dans les différents types de cellules.

- Dans cette thèse, afin de faciliter l'implémentation, nous avons supposé que chaque utilisateur est attaché à une seule cellule ou à une seule RRH (architecture C-RAN). Pour de futurs travaux, nous pouvons envisager des ordonnanceurs multicellulaires qui profitent de la diversité spatiale, temporelle et fréquentielle offerte par la technique de transmission conjointe entre plusieurs points (Joint Transmission)[95, 25]. Cette dernière consiste

à transmettre le signal à un utilisateur à travers plusieurs antennes géographiquement distribuées. Dans ce cadre, la coordination entre plusieurs points de transmission constitue un système MIMO dont ses antennes ne sont pas localisées au même endroit. Ainsi, un ordonnancement coordonné entre plusieurs points de transmission peut être proposé afin de minimiser l'interférence intercellulaire tout en maximisant la capacité du système.

- Nous envisageons d'améliorer notre idée concernant l'association entre RRHs et BBUs en utilisant des techniques d'optimisation. En effet, la solution hybride que nous avons proposée consiste à fixer la stratégie de transmission du système C-RAN en fonction de deux seuils fixes représentant le taux d'utilisation de la bande. Dans ce contexte, un algorithme d'optimisation se basant par exemple sur la théorie des jeux peut être envisagé. D'autre part, nous pouvons exploiter la diminution des interférences entre cellule voisines du mode d'association one-to-many afin d'associer plus de RRHs à un même BBU.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Alfonso Bahillo Martinez. Evaluation of multiuser scheduling algorithm in ofdm for different services. Master's thesis, Institutt for elektronikk og telekommunikasjon, 2006.

[2] Cédric Guéguen. *Allocation de ressources dans les réseaux sans fil à large bande multiporteuses*. PhD thesis, Paris 6, 2010.

[3] Cédric Gueguen and Sébastien Baey. A fair opportunistic access scheme for multiuser ofdm wireless networks. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2009 :14, 2009.

[4] Aleksandra Checko, Henrik L Christiansen, Ying Yan, Lara Scolari, Georgios Kardaras, Michael S Berger, and Lars Dittmann. Cloud ran for mobile networks a technology overview. *IEEE Communications surveys & tutorials*, 17(1) :405–426, 2015.

[5] China Mobile. C-ran : the road towards green ran. *White Paper, ver*, 2, 2011.

[6] 3GPP TS 36.101. E-utra user equipment radio transmission and reception (rel.10), v.10.8.0. 2012-09.

[7] 3GPP TS 36.213. Evolved universal terrestrial radio access (eutra) ; physical layer procedures, version 8.8.0, release 8. 2009.

[8] Vincenzo Sciancalepore, Vincenzo Mancuso, and Albert Banchs. Basics : Scheduling base stations to mitigate interferences in cellular networks. In *World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM), 2013 IEEE 14th International Symposium and Workshops on a*, pages 1–9. IEEE, 2013.

[9] Cisco. Cisco visual networking index global mobile data traffic forecast update. *White Paper*, pages 2 – 3, February 2016.

[10] Cisco. Cisco visual networking index global mobile data traffic forecast update 2016–2021. *White Paper*, pages 1 – 35, February 2017.

[11] ICT-317669 METIS Deliverable 1.1. Metis d1.1. scenarios, requirements and kpis for 5g mobile and wireless system. *Deliverable, Version 1*, April 2013.

[12] Afif Osseiran, Volker Braun, Taoka Hidekazu, Patrick Marsch, Hans Schotten, Hugo Tullberg, Mikko A Uusitalo, and Malte Schellman. The foundation of the mobile and wireless communications system for 2020 and beyond : Challenges, enablers and technology solutions. In *Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2013 IEEE 77th*, pages 1–5. IEEE, 2013.

[13] Jeffrey G Andrews, Stefano Buzzi, Wan Choi, Stephen V Hanly, Angel Lozano, Anthony CK Soong, and Jianzhong Charlie Zhang. What will 5g be ? *IEEE Journal on selected areas in communications*, 32(6) :1065–1082, 2014.

[14] John G. Proakis. *Digital Communications*. 3rd ed. New York : McGraw-Hill, 1995.

[15] Raymond Steele and Lajos Hanzo. *Mobile Communications*. IEEE Computer Society Press, 2000.

[16] Andrea Goldsmith. *Wireless Communications*. Cambridge University Press, 2005.

[17] John David Parsons. *The Mobile Radio Propagation Channel*. Wiley, 1992.

[18] L. Hanzo, J. Akhtman, L. Wang, and M. Jiang. *MIMO-OFDM for LTE, WiFi and WIMAX : Coherent Versus non-Coherent and Cooperative Turbo-Transceivers*. Wiley-IEEE Press, Chichester, UK, October 2010.

[19] E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Skold. *4G LTE and LTE-Advanced for Mobile Broadband*. Elsevier, Oxford, 1 edition, 2011.

[20] A. D. Domenica and E. C. Strinati. A Radio Resource Management Scheduling Algorithm for Self-Organizing Femtocells. In *Proc. IEEE* 21st *Int. Symp. Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications*, pages 191–196, Istanbul, September 2010.

[21] V. Chandrasekhar and J. Andrews. Spectrum Allocation in Tiered Cellular Networks. *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 57(10) :3059–3068, October 2009.

[22] V. Ramachandran, V. Kamble, and S. Kalyanasundaram. Frequency Selective OFDMA Scheduler with Limited Feedback. In *IEEE Wireless Commun. Netw. Conf.*, pages 1604–1609, Las Vegas, April 2008.

[23] S. Yoon and J. Cho. Interference Mitigation in Heterogeneous Cellular Networks of Macro and Femto Cells. In *Proc. Int. Conf. ICTC*, pages 177–181, Seoul, September 2011.

[24] Hussein Taleb, Melhem El Helou, Kinda Khawam, Samer Lahoud, and Steven Martin. Centralized and distributed rrh clustering in cloud radio access networks. In *Computers and Communications (ISCC), 2017 IEEE Symposium on*, pages 1091–1097. IEEE, 2017.

[25] Yannick Bouguen, Eric Hardouin, and François-Xavier Wolff. *LTE et les reseaux 4G*. Editions Eyrolles, 2012.

[26] William C Jakes and Donald C Cox. *Microwave mobile communications*. Wiley-IEEE Press, 1994.

[27] HW Bernhard et al. Mobile radio networks (networking and protocols and traffic performance), 1998.

[28] Bereket Mathewos Hambebo, Marco M Carvalho, and Fredric M Ham. Performance evaluation of static frequency reuse techniques for ofdma cellular networks. In *Networking, Sensing and Control (ICNSC), 2014 IEEE 11th International Conference on*, pages 355–360. IEEE, 2014.

[29] Andrea De Pasquale, Nicola Pio Magnani, and Paolo Zanini. Optimizing frequency planning in the gsm system. In *Universal Personal Communications, 1998. ICUPC'98. IEEE 1998 International Conference on*, volume 1, pages 293–297. IEEE, 1998.

[30] Ronald Y Chang, Zhifeng Tao, Jinyun Zhang, and C-C Jay Kuo. Dynamic fractional frequency reuse (d-ffr) for multicell ofdma networks using a graph framework. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 13(1) :12–27, 2013.

[31] Bernard Sklar. *Digital communications*, volume 2. Prentice Hall Upper Saddle River, 2001.

[32] Ye Geoffrey Li and Gordon L Stuber. *Orthogonal frequency division multiplexing for wireless communications*. Springer Science & Business Media, 2006.

[33] David Tse and Pramod Viswanath. *Fundamentals of wireless communication*. Cambridge university press, 2005.

[34] Erik Dahlman, Stefan Parkvall, Johan Skold, and Per Beming. *3G evolution : HSPA and LTE for mobile broadband*. Academic press, 2010.

[35] David Astély, Erik Dahlman, Anders Furuskär, Ylva Jading, Magnus Lindström, and Stefan Parkvall. Lte : the evolution of mobile broadband. *IEEE Communications magazine*, 47(4), 2009.

[36] Cheong Yui Wong, Roger S Cheng, K Ben Lataief, and Ross D Murch. Multiuser ofdm with adaptive subcarrier, bit, and power allocation. *IEEE Journal on selected areas in communications*, 17(10) :1747–1758, 1999.

[37] Christian Wengerter, Jan Ohlhorst, and Alexander Golitschek Edler von Elbwart. Fairness and throughput analysis for generalized proportional fair frequency scheduling in ofdma. In *Vehicular Technology Conference, 2005. VTC 2005-Spring. 2005 IEEE 61st*, volume 3, pages 1903–1907. IEEE, 2005.

[38] Anteneh A Gebremariam, Tingnan Bao, Domenico Siracusa, Tinku Rasheed, Fabrizio Granelli, and Leonardo Goratti. Dynamic strict fractional frequency reuse for software-defined 5g networks. In *Communications (ICC), 2016 IEEE International Conference on*, pages 1–6. IEEE, 2016.

[39] Irene Katzela and Mahmoud Naghshineh. Channel assignment schemes for cellular mobile telecommunication systems : A comprehensive survey. *Personal Communications, IEEE*, 3(3) :10–31, 1996.

[40] Shao-Yu Lien, Kwang-Cheng Chen, Ying-Chang Liang, and Yonghua Lin. Cognitive radio resource management for future cellular networks. *IEEE Wireless Communications*, 21(1) :70–79, 2014.

[41] Shao-Yu Lien, Shin-Ming Cheng, Sung-Yin Shih, and Kwang-Cheng Chen. Radio resource management for qos guarantees in cyber-physical systems. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 23(9) :1752–1761, 2012.

[42] Jane Wei Huang and Vikram Krishnamurthy. Cognitive base stations in lte/3gpp femtocells : A correlated equilibrium game-theoretic approach. *IEEE Transactions on Communications*, 59(12) :3485–3493, 2011.

[43] Joel S Engel and Martin M Peritsky. Statistically-optimum dynamic server assignment in systems with interfering servers. *Communications, IEEE Transactions on*, 21(11) :1287–1293, 1973.

[44] Ming Zhang and Tak-Shing P Yum. Comparisons of channel-assignment strategies in cellular mobile telephone systems. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 38(4) :211–215, 1989.

[45] Tomson Joe Kahwa and Nicolaos D Georganas. A hybrid channel assignment scheme in large-scale, cellular-structured mobile communication systems. *IEEE Transactions on Communications*, 26(4) :432–438, 1978.

[46] Said M Elnoubi, Rajendra Singh, and Someshwara C Gupta. A new frequency channel assignment algorithm in high capacity mobile communication systems. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 31(3) :125–131, 1982.

[47] Lin Du, John Bigham, and Laurie Cuthbert. Towards intelligent geographic load balancing for mobile cellular networks. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C : Applications and Reviews,*, 33(4) :480–491, 2003.

[48] Israel Koffman and Vincentzio Roman. Broadband wireless access solutions based on ofdm access in ieee 802.16. *Communications Magazine, IEEE*, 40(4) :96–103, 2002.

[49] Guoqing Li and Hui Liu. Downlink radio resource allocation for multi-cell ofdma system. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 5(12) :3451–3459, 2006.

[50] Sungwook Kim and Pramod K Varshney. Adaptive load balancing with preemption for multimedia cellular networks. In *Wireless Communications and Networking, 2003. WCNC 2003. 2003 IEEE*, volume 3, pages 1680–1684. IEEE, 2003.

[51] R. Knopp and P Humblet. Information capacity and power control in single-cell multiuser communications. In *Proc. IEEE Int. Conf. on Communications (ICC)*, volume 1, pages 331 – 335, June 1995.

[52] Cheong Yui Wong and Roger S. Cheng. Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit, and power allocation. *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 1999.

[53] Xudong Wang and Weidong Xiang. An OFDM-TDMA/SA MAC protocol with QoS constraints for broadband wireless LANs. *ACM/Springer Wireless Networks*, 12(2) :159 – 170, 2006.

[54] NGMN Alliance. 5G White Paper. White Paper, February 2015.

[55] METIS D6.6. Final Report on the METIS 5G System Concept and Technology Roadmap. ICT-317669 METIS Deliverable 6.6, Version 1, April 2015.

[56] METIS ICT. 317669-metis/d1. 1,scenarios, requirements and kpis for 5g mobile and wireless system, 2013.

[57] 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)*, pages 705 – 714, San Jose, CA, July 2004.

[58] P.T. Brady. A model for generating on-off speech patterns in two-way conversation. *Bell System Technical Journal*, 48, 1969.

[59] C. Gueguen, M. Ezzaouia, and M. Yassin. Inter-Cellular Scheduler for 5G Wireless Networks. *Elselvier Physical Communication*, 18(2) :113 – 124, 2015.

[60] Mahdi Ezzaouia, Cédric Gueguen, Mahmoud Ammar, Sébastien Baey, Xavier Lagrange, and Ammar Bouallègue. A dynamic inter-cellular bandwidth fair sharing scheduler for future wireless networks. *Physical Communication*, 25 :85–99, 2017.

[61] *A Novel Algorithm for Distributed Dynamic Interference Coordination in Cellular OFDMA Networks-Communication Networks and Computer Engineering, author=Necker, M, year=2009, school=Ph. D. dissertation, Universität Stuttgart*. PhD thesis.

[62] Roberto Bosisio and Umberto Spagnolini. Interference coordination vs. interference randomization in multicell 3gpp lte system. In *Wireless Communications and Networking Conference, 2008. WCNC 2008. IEEE*, pages 824–829. IEEE, 2008.

[63] Mohamad Yassin. *Inter-Cell Interference Coordination in Wireless Networks.(Coordination des interférences intercellulaires dans les réseaux sans-fil).* PhD thesis, University of Rennes 1, France, 2015.

[64] Abdelbaset S Hamza, Shady S Khalifa, Haitham S Hamza, and Khaled Elsayed. A survey on inter-cell interference coordination techniques in ofdma-based cellular networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 15(4) :1642–1670, 2013.

[65] Raymond Kwan and Cyril Leung. A survey of scheduling and interference mitigation in lte. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2010 :1, 2010.

[66] X Yang. Soft frequency reuse scheme for utran lte. *Huawei, 3GPP R1-050507, TSG-RAN1*, 41, 2005.

[67] Chen Jiming, Wang Peng, and Zhang Jie. Adaptive soft frequency reuse scheme for in-building dense femtocell networks. *China Communications*, 10(1) :44–55, 2013.

[68] Mohamad Assaad. Optimal fractional frequency reuse (ffr) in multicellular ofdma system. In *Vehicular Technology Conference, 2008. VTC 2008-Fall. IEEE 68th*, pages 1–5. IEEE, 2008.

[69] G González, Mario García-Lozano, Silvia Ruiz, Joan Olmos, et al. On the need for dynamic downlink intercell interference coordination for realistic long term evolution deployments. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 14(4) :409–434, 2014.

[70] Haipeng Lei, Lei Zhang, Xin Zhang, and Dacheng Yang. A novel multi-cell ofdma system structure using fractional frequency reuse. In *2007 IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, pages 1–5. IEEE, 2007.

[71] Theodore S Rappaport et al. *Wireless communications : principles and practice*, volume 2. Prentice Hall PTR New Jersey, 1996.

[72] Giuseppe Piro, Nicola Baldo, and Marco Miozzo. An lte module for the ns-3 network simulator. In *Proceedings of the 4th International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques*, pages 415–422. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering), 2011.

[73] Hanbyul Seo and Byeong Gi Lee. A proportional-fair power allocation scheme for fair and efficient multiuser ofdm systems. In *Global Telecommunications Conference, 2004. GLOBECOM'04. IEEE*, volume 6, pages 3737–3741. IEEE, 2004.

[74] Maryum Hina and Sarmad Sohaib. Centralized dynamic frequency allocation for cell-edge demand satisfaction in fractional frequency reuse networks. *Telecommunication Systems*, pages 1–14, 2017.

[75] Ergin Dinc and Mutlu Koca. On dynamic fractional frequency reuse for ofdma cellular networks. In *Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2013 IEEE 24th International Symposium on*, pages 2388–2392. IEEE, 2013.

[76] Mohamad Yassin, Mohamed A AboulHassan, Samer Lahoud, Marc Ibrahim, Dany Mezher, Bernard Cousin, and Essam A Sourour. Survey of icic techniques in lte networks under various mobile environment parameters. *Wireless Networks*, 23(2) :403–418, 2017.

[77] Thomas Novlan, Jeffrey G Andrews, Illsoo Sohn, Radha Krishna Ganti, and Arunabha Ghosh. Comparison of fractional frequency reuse approaches in the ofdma cellular downlink. In *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010), 2010 IEEE*, pages 1–5. IEEE, 2010.

[78] Dai Kimura, Yuya Harada, and Hiroyuki Seki. De-centralized dynamic icic using x2 interfaces for downlink lte systems. In *Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2011 IEEE 73rd*, pages 1–5. IEEE, 2011.

[79] Ioannis N Stiakogiannakis and Dimitra I Kaklamani. Fractional frequency reuse techniques for multi-cellular wimax networks. In *Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2010 IEEE 21st International Symposium on*, pages 2432–2437. IEEE, 2010.

[80] Georgios Kardaras and Christian Lanzani. Advanced multimode radio for wireless & mobile broadband communication. In *Wireless Technology Conference, 2009. EuWIT 2009. European*, pages 132–135. IEEE, 2009.

[81] Interface Specification. Common public radio interface (cpri) ; interface specification. *version*, 6 :128, 2004.

[82] Reference Document. Open base station architecture initiative (obsai) bts system. *Version 2.0*, page 12, 2006.

[83] ETSI GS ORI 002-1 V1.1.1. Open radio equipment interface (ori). *ORI Interface Specification Part 1 : Low Layers (Release 1)*, page 12, 2010-2011.

[84] ETSI GS ORI 002-2 V1.1.1. Open radio equipment interface (ori). *ORI Interface Specification ; Part 2 : Control and Management (Release 1)*, page 12, 2012.

[85] Yonghua Lin, Ling Shao, Zhenbo Zhu, Qing Wang, and Ravie K Sabhikhi. Wireless network cloud : Architecture and system requirements. *IBM Journal of Research and Development*, 54(1) :4–1, 2010.

[86] Shidong Zhou, Ming Zhao, Xibin Xu, Jing Wang, and Yan Yao. Distributed wireless communication system : a new architecture for future public wireless access. *IEEE Communications Magazine*, 41(3) :108–113, 2003.

[87] F. Anger. Smart mobile broadband. *proceedings of RAN Evolution to the Cloud Workshop*, page 14, 2013.

[88] Gabriel Brown. Converging telecom & it in the lte ran. *White Paper, Heavy Reading*, 1(2.1) :2, 2013.

[89] Bruno Astuto A Nunes, Marc Mendonca, Xuan-Nam Nguyen, Katia Obraczka, and Thierry Turletti. A survey of software-defined networking : Past, present, and future of programmable networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 16(3) :1617–1634, 2014.

[90] Karen Boulos, Melhem El Helou, and Samer Lahoud. Rrh clustering in cloud radio access networks. In *Applied Research in Computer Science and Engineering (ICAR), 2015 International Conference on*, pages 1–6. IEEE, 2015.

[91] Karen Boulos, Melhem El Helou, Marc Ibrahim, Kinda Khawam, Hadi Sawaya, and Steven Martin. Interference-aware clustering in cloud radio access networks. In *Cloud Networking (CloudNet), 2017 IEEE 6th International Conference on*, pages 1–6. IEEE, 2017.

[92] Yuhuan Du and Gustavo De Veciana. Wireless networks without edges dynamic radio resource clustering and user scheduling. In *INFOCOM, 2014 Proceedings IEEE*, pages 1321–1329. IEEE, 2014.

[93] Daewon Lee, Hanbyul Seo, Bruno Clerckx, Eric Hardouin, David Mazzarese, Satoshi Nagata, and Krishna Sayana. Coordinated multipoint transmission and reception in lte-advanced : deployment scenarios and operational challenges. *IEEE Communications Magazine*, 50(2), 2012.

[94] Menglan Jiang, Massimo Condoluci, and Toktam Mahmoodi. Network slicing management & prioritization in 5g mobile systems. In *European Wireless 2016 ; 22th European Wireless Conference ; Proceedings of*, pages 1–6. VDE, 2016.

[95] Stefan Brueck, Lu Zhao, Jochen Giese, and M Awais Amin. Centralized scheduling for joint transmission coordinated multi-point in lte-advanced. In *Smart Antennas (WSA), 2010 International ITG Workshop on*, pages 177–184. IEEE, 2010.

LISTE DES PUBLICATIONS

Articles dans des revues internationales à comité de lecture

[1] **Ezzaouia, M.**, Gueguen, C., Ammar, M., Baey, S., Lagrange, X., Bouallegue, A. (2017). A Dynamic Inter-cellular Bandwidth Fair Sharing scheduler for future wireless networks. Physical Communication, 25, 85-99.

[2] Gueguen, C., **Ezzaouia, M.**, Yassin, M. (2016). Inter-cellular scheduler for 5G wireless networks. Physical Communication, 18, 113-124.

Communications dans des conférences internationales à comité de lecture

[1] **Ezzaouia, M.**, Gueguen, C., El Helou, M., Ammar, M., Lagrange, X., Bouallegue, A. (2018, April). A dynamic transmission strategy based on network slicing for cloud radio access networks. In Wireless Days (WD), 2018 (pp. 40-45). IEEE.

[2] **Ezzaouia, M.**, Gueguen, C., Yassin, M., Ammar, M., Lagrange, X., Bouallegue, A. (2017, October). Autonomous and Dynamic Inter-Cell Interference Coordination Techniques for Future Wireless Networks. In WiMob 2017-13th IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications.

UNIVERSITE BRETAGNE LOIRE / MATHSTIC

IMT Atlantique
Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom

Titre : Allocation de ressource opportuniste dans les réseaux sans fil multicellulaires

Mots clés : Qualité de service, Ordonnancement, Allocation de ressources, OFDMA, Gestion des interférences, C-RAN.

Résumé : La forte croissance du trafic dans les réseaux mobiles s'accompagne d'une augmentation de son hétérogénéité, tant dans l'espace qu'au cours du temps. Cette thèse porte sur des algorithmes d'ordonnancement adaptés à des trafics avec des zones à forte concentration et variables dans le temps.

Nous proposons un mécanisme de prêt de la ressource spectrale d'une cellule en sous- charge à une voisine en surcharge combinée à un ordonnancement réactif au sein de chaque cellule.

Nous nous intéressons aussi à l'architecture Cloud Radio Access Network qui sépare les têtes de transmission radio (Remote Radio Heads, RRHs) des unités de traitement en bande de base (Baseband Units, BBUs). L'interconnexion entre les BBUs et les RRHs se fait selon deux modes. Le premier est appelé association bi-univoque et consiste à allouer les unités de ressources de la trame radio d'une BBU à une seule RRH.

Dans le second mode, appelé association multiple, une BBU peut gérer plusieurs RRHs. Nous proposons un mode d'association hybride dans lequel les unités de ressource de chaque trame sont réparties en deux tranches. La première constitue une tranche non partagée qui est allouée aux utilisateurs centraux selon l'association bi-univoque afin d'augmenter le débit notamment à haute charge de trafic. La deuxième tranche est constituée par une quantité d'unités de ressources partagées par un groupe de RRHs appartenant au même BBU. Cette tranche commune est configurée en association multiple et est allouée aux utilisateurs frontaliers et mobiles. Nous montrons que le mode hybride réduit les interférences intercellulaires, diminue le nombre de handover inter-BBU et améliore la consommation énergétique.

Title : Opportunistic resource allocation in wireless multicellular networks

Keywords : Quality of Service, Scheduling, Resource allocation, OFDMA, Interference management, C-RAN

Abstract: The exponential growth of traffic in mobile networks is accompanied by an increase in its heterogeneity, both in space and over time. This thesis deals with scheduling algorithms adapted to highly concentrated and time-varying traffic zones.

We propose a spectrum borrowing mechanism from an under-loaded cell to an overloaded one combined with a reactive intra-cellular scheduling algorithm.

We are also interested in the Cloud Radio Access Network architecture that separates the Radio Head (RRH) from the Baseband Unit (BBU). The BBU is connected to the RRU according to two modes. The first one is called a one-to-one association and consists in allocating the resource units of the BBU radio frame to a single RRH.

In the second mode which is called multiple association, a BBU can handle multiple RRHs. We propose a hybrid association mode in which the resource units of each frame are divided into two slices. The first one constitutes an unshared slice and is allocated to central users according to the one-to-one association in order to increase the throughput, especially at high traffic load. The second slice contains a quantity of resource units that are shared by a group of RRHs belonging to the same BBU. This common slice is configured according to the multiple association mode and is allocated to the edge and mobile users. We show that the hybrid mode reduces the inter-cell interferences, decreases the number of inter-BBU handovers and improves the energy consumption.