



HAL
open science

Modèles multicellulaires pour les réseaux mobiles 4G

Narcisse Nya Kamtchoum

► **To cite this version:**

Narcisse Nya Kamtchoum. Modèles multicellulaires pour les réseaux mobiles 4G. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. Sorbonne Université, 2018. Français. NNT : 2018SORUS079 . tel-02492955

HAL Id: tel-02492955

<https://theses.hal.science/tel-02492955>

Submitted on 27 Feb 2020

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.



Sorbonne Université

École Doctorale Informatique, Télécommunications et
Électronique (EDITE)

LIP6/NPA

Modèles Multicellulaires pour les Réseaux Mobiles 4G

Par Narcisse Nya Kamtchoum

Thèse de doctorat de Réseaux et Télécommunication

Dirigée par Bruno Baynat et Serge Fdida

à soutenir le : 6 juillet 2018 devant le jury composé de :

Rapporteurs :	Gentian Jakllari	Maître de Conférences HDR, Université de Toulouse
	Salah Eddine Elayoubi	Professeur, CentraleSupélec
Examineurs :	Isabelle Guérin Lassous	Professeur, Université Claude Bernard Lyon 1
	Vania Conan	Responsable de Recherche HDR, THALES
	Tijani Chahed	Professeur, Télécom SudParis
Encadrants :	Bruno Baynat	Maître de Conférences, Sorbonne Université
	Serge Fdida	Professeur, Sorbonne Université

Cette page a été intentionnellement laissée vierge

Remerciements

Cette thèse de doctorat qui marque l'achèvement de ma scolarité m'a permis de m'enrichir sur le plan scientifique et personnel, en m'offrant un angle de vue nouveau sur le monde qui m'entoure. Elle m'a également permis de comprendre qu'il est toujours possible d'aller plus loin, de trouver des moyens pour venir à bout des difficultés. Cette thèse de doctorat aura reçu le soutien et l'accompagnement de beaucoup de personnes que j'aimerais remercier.

Je veux ici remercier les rapporteurs Gentian Jakllari et Salah Eddine Elayoubi d'avoir accepté de commenter ma thèse. Je les remercie également pour tout le temps passé à la lire et à rédiger leur rapport. Leurs remarques m'ont permis d'améliorer la qualité du manuscrit et de ma présentation. Je remercie aussi à remercier Isabelle Guérin Lassous, Vania Conan et Tijani Chahed d'avoir accepté de faire partie de mon jury et évaluer le travail réalisé au cours de ma thèse. Je tiens à adresser mes remerciements à Bruno Baynat qui a encadré cette thèse. Ce fut un travail sur le long terme et pas toujours simple. J'ai eu la chance de pouvoir profiter de ses conseils et de ses idées. J'espère qu'il m'aura transmis son goût pour l'exigence et la rigueur. Je tiens aussi à remercier le professeur Serge Fdida pour avoir dirigé cette thèse, mais aussi pour avoir financé ma participation à des conférences qui ont été très enrichissantes sur le plan personnel et scientifique.

Je voudrais aussi remercier mon ami Thiago Abreu pour toutes les discussions que nous avons eues et le temps passé à m'aider à améliorer mon travail. Bien des idées ont germé à la suite de nos discussions. Je voudrais aussi remercier Alain Simonian, Philippe Olivier, Raluca-Maria Indre avec qui j'ai eu la chance de collaborer. Je remercie chaleureusement les membre de l'équipe NPA, les permanents comme Promethee Spathis, Marcelo Dias de Amorim, Sébastien Tixeuil et Maria Potop-Butucaru mais aussi les doctorants Amr, Giovanni, Mustapha, Quentin, Alexandre, Benjamin, Salah, Fadwa, Florent, Antonella, Giulio, Wafa, Nour.

Je remercie très vivement ma marraine et son mari Claudie et Jean-Marie Pruvost-Beaurain pour leur contribution à cette thèse, mais aussi pour le soutien constant qu'ils m'ont toujours apporté.

Enfin, je ne pourrais sans doute jamais assez remercier ma famille pour leur soutien continu. Spécialement mes regrettés parents David et Claudine Kamtchoum qui m'ont toujours encouragé, motivé et qui ont toujours été présents dans mes pensées à chaque étape de ma scolarité. Mon oncle Alain Nyasse Nya pour l'homme qu'il est et sa femme

Ferry Nyasse Nya donc le soutien va bien au delà de cette thèse. Sans eux rien de tout ceci n'aurait été possible. Mes tantes Jeannette Kuija, Yvonne pour la bienveillance qu'elles ont toujours fait preuve à mon égard, mais également mes autres tantes, mes oncles, cousins et cousines que je ne cite pas ici. Mes frères Clarence Kuitchoua et Rodrigue Tchoukeu, ma sœur Joseline Djike et ma belle mère Jeannette Jaji pour leur présence et le soutien qu'ils n'ont jamais cessé de m'accorder. Je voudrais aussi remercier Serge Ngassam Kouamen pour son soutien et sa façon d'être, mais aussi pour avoir toujours été de bon conseil.

Merci à Marie-Hélène Lainé pour sa présence sa compréhension et surtout pour ce qu'elle représente pour moi aujourd'hui.

Résumé

Afin de satisfaire le besoin toujours croissant en débit et offrir toujours plus de services, ce où que les utilisateurs se trouvent, les réseaux cellulaires évoluent rapidement vers des technologies caractérisées par une interface radio de plus en plus sophistiquée. Par exemple, alors que le déploiement des réseaux 4G ne faisaient que commencer, les premières mises à jour vers les solutions LTE-A étaient déjà planifiées par les opérateurs, et actuellement, les technologies 5G font l'objet de recherches actives à travers le monde. Ces changements rapides sont motivés par l'explosion du trafic mobile, comme le montrent des nombreuses études et observations sur les réseaux actuels. Ce trafic est principalement généré par des utilisateurs équipés de smartphones, tablettes, et autres équipements mobiles. Néanmoins, les réseaux actuels ont du mal à s'adapter à cette proportion toujours grandissante d'utilisateurs mobiles et à leur fournir un service adapté. Dans ce contexte, un des enjeux importants pour les opérateurs et équipementiers est de disposer d'outils efficaces pour évaluer les performances de leurs réseaux et mieux les dimensionner.

Cette thèse porte donc sur le développement de modèles analytiques, à la fois précis et simples d'utilisation, permettant de répondre aux problèmes posés par l'évaluation de performances dans les réseaux cellulaires de nouvelle génération. Les modèles s'appuient sur la théorie des files d'attente et des processus stochastiques et permettent d'évaluer les performances d'un réseau et de ses utilisateurs en tenant compte de leur mobilité. Dans un premier temps, sont présentés tour à tour des modèles dédiés aux différents types de cellules rencontrées dans les réseaux cellulaires et aux utilisateurs qui visitent ces cellules. Dans un second temps, des modèles dédiés à un réseau cellulaire dans son ensemble sont présentés. Ces modèles réseaux combinent les précédents modèles dédiés aux cellules et un modèle de routage reproduisant le routage des utilisateurs mobiles entre les différentes cellules qui constituent le réseau. Tous les modèles proposés ont été pensés afin d'obtenir des expressions simples de l'ensemble des paramètres de performances du système. Cette simplicité associée à la rapidité de résolution rend possible les études de performance des systèmes les plus complexes, comme en témoignent les nombreux exemples inclus dans cette thèse.

Mots clés

Réseaux cellulaires, Mobilité, Modélisation analytique, Évaluation de performances, LTE, Théorie des files d'attente, Processus stochastiques, Simulations.

Abstract

In order to meet the ever-increasing need for bandwidth and to offer ever more services, wherever users are, cellular networks are rapidly evolving towards technologies characterized by an increasingly sophisticated radio interface. For example, while the deployment of 4G networks was just beginning, operators already planned the first updates to LTE-A solutions and 5G technologies are currently receiving active attention. These rapid changes are motivated by the explosion of mobile traffic, as shown by numerous studies and observations on current networks. Users equipped with smartphones, tablets, and other mobile devices mainly generate this traffic.

However most of models for cellular networks in literature do not take into account mobility of users. Authors who have tried to take into account users' mobility, propose models based on hypotheses like users moving with infinite speed. In this thesis we have developed analytical models for 4G and 5G cellular networks taking into account user mobility in a realistic way. The proposed models were designed to be simple and easy to solve, allowing users and networks performance to be evaluated almost instantaneously.

Our first analysis and results were on the impact of mobility in dense LTE-A networks with small cells. We developed two models to access static users performance in small cell with mixed users (static and mobile users). The first model is based on Markov chains and the second one on Processor-Sharing queue. Our second analysis and results were on LTE/LTE-A macrocells with two coding zones and visited by mobile users. We proposed a model based on queuing theory to study the performance of mobile users in a LTE/LTE-A macrocell with different radio conditions over its coverage area. Then, we have then extended these models to the case of homogeneous cellular networks where cells are statistically identical. These models allowed us to show the positive impact of user mobility on performance in a cell or in a network. Moreover, we showed that this performance gain was not a monotonous function of user mobility, which is an important result showing the impact of hard handover implemented in LTE and LTE-A networks on performance. Finally, we turned our attention to heterogeneous networks with different type of cells and visited by users with different profiles (speed, amount of data to be transferred).

Cette page a été intentionnellement laissée vierge

Table des matières

Remerciements	3
Résumé	5
Abstract	7
Introduction	12
1 Modélisation du système	20
1.1 Introduction	20
1.2 Système étudié	20
1.2.1 Multiplexage et codage	21
1.2.2 <i>Modulation and Coding Scheme</i> (MCS)	23
1.2.3 Découpage de la ressource radio en RB	24
1.3 Hypothèses de modélisation	24
1.3.1 Canal radio	25
1.3.2 Trafic	25
1.3.3 Mobilité des utilisateurs	25
1.3.4 Politiques d'allocation	26
1.4 Synthèse	26
2 Les files Processor Sharing	28
2.1 Introduction	28
2.2 Les files d'attente	28
2.2.1 Processus d'arrivée	29
2.2.2 Capacité de la file	29
2.2.3 Temps de service	29
2.3 File PS	30
2.3.1 File PS simple	30
2.3.2 File PS multiclasse	32
2.4 Synthèse	34

3	Analyse de performance des réseaux cellulaires	35
3.1	Introduction	35
3.2	Simulations	35
3.2.1	Interface radio	36
3.2.2	Algorithmes et protocoles	37
3.2.3	Limites des simulations	38
3.3	Modélisation analytique	39
3.3.1	Modélisation du trafic	39
3.3.2	Mobilité des utilisateurs	42
3.3.3	Modélisation des réseaux	43
3.4	Synthèse	48
4	Cellule isolée à capacité constante	49
4.1	Introduction	49
4.2	Système	49
4.3	Modèles	51
4.3.1	Modèle markovien	51
4.3.2	Modèle file PS	52
4.4	Description du simulateur	55
4.5	Validation	56
4.6	Impact des paramètres clés	59
4.7	Synthèse	59
5	Macrocellule isolée avec différentes zones de codage	61
5.1	Introduction	61
5.2	Système	61
5.2.1	Une macrocellule LTE offrant J zones de codage	61
5.2.2	Trafic et mobilité	62
5.2.3	Estimation des paramètres lorsque les zones forment des cercles concentriques	63
5.3	Modèle	64
5.3.1	Macrocellule ouverte	64
5.3.2	Extension pour prendre en compte les utilisateurs venant des cellules voisines	66
5.3.3	Stabilité du système	67
5.3.4	Performances des utilisateurs dans la cellule	70
5.3.5	Performances de bout en bout	71
5.4	Évaluation numérique	72
5.4.1	Validation	72
5.4.2	Performances de bout en bout	75
5.4.3	Impact de la mobilité des utilisateurs	76
5.5	Dimensionnement	77
5.6	Synthèse	79

6	Modèles pour des réseaux hétérogènes avec différentes classes d'utilisateurs	81
6.1	Introduction	81
6.2	Système	81
6.2.1	Réseaux hétérogènes	81
6.2.2	Modèle de mobilité et trafic	82
6.3	Modèle	83
6.3.1	Modèle d'une macrocellule isolée	83
6.3.2	Stabilité et bornes de performances	85
6.3.3	Modèle pour un réseau de macrocellules hétérogènes	87
6.4	Résultats de performance	88
6.4.1	Performance des utilisateurs de type k dans une cellule isolée	88
6.4.2	Performance de bout en bout des utilisateurs de type k	88
6.5	Validation	91
6.5.1	Performance des utilisateurs dans une cellule isolée	91
6.5.2	Performance des utilisateurs dans le réseau	93
6.5.3	Impact de la distribution du temps de séjour dans une zone	96
6.5.4	Impact de la distribution du volume de données	98
6.6	Exemples d'utilisation des modèles	100
6.6.1	Problèmes : dimensionnement	100
6.6.2	Problème : efficacité d'utilisation de la ressource radio	101
6.6.3	Solution : problème de dimensionnement	101
6.6.4	Solution : efficacité d'utilisation de la ressource radio	105
6.7	Synthèse	106
	Conclusion	108
	Annexe A	112
	Annexe B	114
	Bibliographie	117

Introduction

Contexte

Depuis le début des années 1980, les communications sans fil en situation de mobilité ont connu un essor sans précédent. Afin de répondre à une demande toujours grandissante, les réseaux cellulaires sont en perpétuelle évolution aussi bien sur le plan des infrastructures que sur celui des services offerts. Cette évolution s'accompagne de nouvelles technologies caractérisées par des interfaces radio de plus en plus sophistiquées correspondant à chaque fois à l'avènement d'une nouvelle génération de réseaux cellulaires. Ainsi depuis l'apparition de la première génération de réseaux cellulaire au début des années 1980, quatre générations se sont succédées. La première génération (1G), constituée de systèmes de communication analogique, reposait sur les technologies AMPS (*Advanced Mobile Phone System*) et TACS (*Total Accès Communication Sytem*). La deuxième génération (2G), apparue dans les années 1990, repose principalement sur les technologies GSM (*Global System For Mobile communication*), GPRS (*General Packet Radio Service*) et EDGE (*Enhanced Data Rates for GSM Evolution*). Cette génération marque l'entrée dans l'ère moderne des réseaux cellulaires avec le passage de l'analogique au numérique. La troisième génération (3G) a été introduite dans les années 2000. S'appuyant sur les technologies UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) et HSPA (*High Speed Packet Access*), la 3G permet d'atteindre des débits de transmission bien plus importants et de démocratiser l'utilisation des téléphone mobiles en proposant un éventail de services Internet en plus de la téléphonie.

La quatrième génération (4G), introduite en 2010, marque l'avènement du tout IP et de l'intégration de service, marquant un changement radical par rapport aux précédentes générations de réseaux cellulaires. Le LTE, qui est la technologie de quatrième génération qui s'est le mieux imposée, est en complète rupture avec les technologies antérieures telles que l'UMTS et le HSPA en introduisant une nouvelle couche physique et en réformant le réseau cœur. Les principales raisons de ces changements dans la conception du réseau d'accès radio sont la nécessité d'une efficacité spectrale plus élevée, un meilleur délai pour pouvoir répondre aux besoins de nouvelles applications et une flexibilité plus grande quant à l'utilisation des réseaux [1].

En effet, les premières générations de réseaux cellulaires étaient conçues pour transporter la téléphonie mobile et accessoirement des données en mode circuit. Cela entraînait une utilisation peu efficace des ressources. Parallèlement, le développement

d'Internet et l'élaboration de protocoles de communication temps réel, tels que *Voice over IP* (VoIP), ont permis d'associer architecture à commutation de paquets et transport de trafic avec contrainte temporelle. Ceci a été un progrès considérable, car la communication en mode paquet conduit à une meilleure utilisation des ressources du réseau et donc à une augmentation de sa capacité.

Les réseaux cellulaires 4G ont donc naturellement abandonné totalement la commutation de circuits au profit d'une architecture à commutation de paquets entièrement basée sur IP. De plus, l'aspect entièrement IP facilite l'interconnexion avec Internet et par la même occasion l'accès à ses nombreuses applications et services. Il s'agit là de l'un des objectifs majeurs de la 4G : prendre en charge simultanément un grand nombre de services, qu'ils soient temps réel (voix, vidéo) ou non (WEB, transfert de fichiers). Aujourd'hui des travaux intenses sont menés à travers le monde pour mettre sur pied la 5G dont les premières expérimentations sont prévues pour 2018 et les premières commercialisations pour 2020. L'objectif visé par la 5G est de répondre aux besoins engendrés par des nouveaux services tels que la réalité virtuelle, la télémédecine, les voitures autonomes, la 4K, les *smart cities* mais aussi d'étendre la connectivité. En effet, alors que la 4G sert à connecter les personnes (via leur *smartphones*, tablettes, etc) à Internet, la 5G servira principalement à connecter les objets à Internet, soient des dizaines de milliards d'appareils, machines et engins en tous genres (automobile, électroménager, capteurs industriels et agricoles...). Par ailleurs, pour atteindre ces objectifs, la 5G doit assurer une parfaite fiabilité des communications, plus question de tolérer que le réseau « tombe ». En plus de toutes ces contraintes, la 5G se doit aussi d'intégrer la réduction de la consommation d'énergie de certains types d'objets connectés, particulièrement des capteurs utilisés dans l'industrie, l'agriculture ou dans la logistique. Elle devra surtout permettre de réduire les temps de latence car la réactivité des réseaux est indispensable pour de nombreuses applications comme les voitures autonomes, les interventions médicales à distance, la gestion de l'énergie en temps réel. La latence étant essentiellement influencée par la distance géographique et l'environnement de propagation du signal, la prise en compte de la mobilité des utilisateurs et équipements sera donc un enjeu important voir primordial.

Ces réseaux d'accès qui prévoient de supporter de nombreuses applications ayant toutes des besoins spécifiques, doivent par ailleurs nécessiter pour chaque cellule l'utilisation d'importantes plages de fréquences dont l'attribution est très coûteuse. Équiptementiers et opérateurs doivent donc être capables de paramétrer au mieux les cellules déployées afin d'assurer les meilleures qualités de services à leurs clients tout en réduisant les coûts au maximum. Pour ce faire, ils ont besoin d'outils à la fois rapides et efficaces pour évaluer les performances des réseaux actuels et à venir en prenant en compte le comportement des utilisateurs et les spécificités des réseaux cellulaires. C'est là tout l'intérêt de cette thèse qui s'attache au développement de modèles analytiques simples et robustes tenant compte de la mobilité des utilisateurs dans les réseaux cellulaires.

Avant d'exposer les objectifs visés dans le développement de tels modèles, nous présentons dans un premier temps les motivations nous ayant poussés vers la conception

de modèles analytiques dédiés à l'évaluation de performances dans les réseaux cellulaires en général et les réseaux *LTE/LTE_A* en particulier.

Motivations

Les évolutions rapides des réseaux cellulaires sont essentiellement motivées par l'augmentation permanente du volume du trafic mobile. Comme le montre plusieurs études de *Cisco Visual Networking Index* (VNI), le trafic généré par des équipements mobiles aura triplé entre 2016 et 2021, avec une augmentation annuelle de 26%. Cependant, les opérateurs ont du mal à satisfaire une demande toujours grandissante en débit et à fournir aux clients une qualité d'expérience satisfaisante. Dans ce contexte, un enjeu majeur pour les opérateurs et équipementiers est de disposer d'outils simples et efficaces pour mieux comprendre le comportement de leurs réseaux et évaluer la qualité des services offerts aux utilisateurs.

Méthodes d'évaluation de performances

Pour évaluer les performances d'un système, trois types d'approches peuvent être envisagés :

- L'expérimentation sur des réseaux existants. Si cette approche est clairement inconcevable pour des raisons financières évidentes, soulignons tout de même que l'utilisation d'infrastructures expérimentales émergentes telles que OneLab [2] pourrait être envisagée. Dans tous les cas, cette option ne permettrait d'évaluer un réseau que dans un cadre très limité et dans des délais vraiment importants puisqu'il faudrait émuler chaque configuration dont on voudrait estimer les performances. Au final, son intérêt repose donc davantage dans la vérification de la validité des autres méthodes d'évaluation de performances que dans l'évaluation de performances elle-même. Car dans ce contexte, l'émulation du système ne se fera que sur quelques scénarios de validation.
- La simulation. Elle apparaît souvent comme simple à mettre en œuvre. Elle consiste en une série de calculs effectués sur un ordinateur et reproduisant un phénomène physique. Elle aboutit à la description du résultat de ce phénomène, comme s'il s'était réellement déroulé. Les simulations nécessitent néanmoins, pour obtenir des résultats fiables, d'intégrer au simulateur de nombreux aspects du système considéré. Aussi, en fonction du niveau de détail implémenté, les calculs requis par chaque simulation induisent des temps d'exécution pouvant durer plusieurs jours. Ces temps considérables sont de plus à répéter pour chaque configuration que l'on souhaite tester. Une évaluation de performances par simulations demande donc des délais devenant rapidement bien trop importants. Les durées demandées par les simulations constituent ainsi l'inconvénient majeur de cette approche mais ce n'est pas le seul. En effet, le choix du simulateur pouvant reproduire les configurations avec le niveau de détail souhaité n'est pas non plus

chose aisée.

- Les modèles analytiques. Leur conception est fondée sur une série d'hypothèses de modélisation permettant de simplifier la représentation du système auquel on s'intéresse. Cette approche donne la possibilité d'élaborer des outils de modélisation et d'évaluation de performances rapides et fiables. Cependant, il est impératif pour obtenir la rapidité et la fiabilité escomptées de trouver le juste équilibre entre d'une part, l'éloignement du modèle obtenu dû aux hypothèses de modélisation avec la réalité et, d'autre part, la complexité de résolution du modèle. En effet, les modèles analytiques respectant ce compromis représentent le système avec des hypothèses moins restrictives qu'en simulation. De ce fait, ils permettent d'obtenir des résultats bien plus rapidement et apportent par la même occasion la possibilité de répondre presque instantanément aux problèmes d'évaluation les plus complexes. Enfin, précisons que l'étude des expressions mathématiques constituant ces modèles peut permettre de dégager des propriétés intéressantes du système étudié.

Objectif de la thèse

Un petit tour d'horizon de la littérature consacrée à l'évaluation de performance dans les réseaux cellulaires montre l'absence d'outils à la fois simples et adaptés pour cette tâche. Par ailleurs, les différents modèles analytiques existant apportent très peu de réponses ou sont trop complexes pour être utilisés dans les cas non spécifiques de l'évaluation d'une technologie donnée. En effet, les modèles suffisamment détaillés pour prendre en compte à la fois les caractéristiques de ces réseaux et la mobilité des utilisateurs reposent pour la plupart sur l'utilisation de techniques de résolutions numériques coûteuses en temps de calculs [92, 115] ou sur des chaînes multidimensionnelles complexes.

Ce constat nous a donc naturellement dirigés vers le développement de modèles analytiques à la fois précis, rapides et adaptés à l'évaluation des performances des réseaux cellulaires de nouvelle génération. L'ambition de cette thèse est de proposer des techniques robustes d'évaluation des performances des réseaux cellulaires en prenant en compte la variabilité des conditions radio des utilisateurs et leur mobilité dans les cellules et dans le réseau. Les modèles développés doivent également intégrer un niveau de détail suffisant pour garantir la qualité des résultats produits tout en gardant une certaine généralité leur permettant d'être utiles pour les prochaines générations de réseaux cellulaires. Dans un premier temps, des modèles monocellulaires, c'est-à-dire dédiés à une seule cellule, ont été élaborés. Ces modèles ont été déclinés afin de prendre en compte les petites cellules dont la qualité du canal de transmission reste constante sur toute la zone de couverture [3] et les macrocellules avec une qualité du canal de transmission variable sur la zone de couverture [4, 5, 6]. Puis, dans un second temps, des modèles pour des réseaux de cellules hétérogènes ont été proposés en prenant soin de limiter la complexité de leur résolution [7]. Les modèles dans leur ensemble ont ainsi

été conçu de façon à pouvoir obtenir les paramètres de performances requis à partir d'expressions simples, donc instantanément, et ce même lorsque l'on considère des scénarios complexes de réseaux hétérogènes. Cette rapidité et cette simplicité permettent alors d'envisager l'extension de ces modèles à des systèmes encore plus complexes. Les outils mathématiques utilisés pour le développement de ces modèles sont issus de la théorie des files d'attente, et plus particulièrement de celle des files *Processor Sharing* (PS) que nous présentons dans le chapitre 1, mais aussi des processus stochastiques.

Pour finir, signalons qu'une partie des travaux menés aux cours de cette thèse ont été réalisés dans le cadre du projet ANR IDEFIX.

Plan de la thèse

Afin de présenter dans les meilleures conditions les travaux réalisés, cette thèse s'articule autour de cinq chapitres distincts.

Le chapitre 1 décrit brièvement le système étudié et rassemble les hypothèses de modélisation communes aux modèles proposés. Afin de mettre en lumière les aspects à prendre en compte lors de la modélisation de réseaux cellulaires de nouvelle génération, une attention particulière est portée à l'interface radio et aux mécanismes de partage de ressources et de transmission de données. Ensuite, les hypothèses de modélisation sont présentées et discutées afin d'en justifier la validité mais également la possibilité d'être relaxées. Pour finir, ce chapitre donne un aperçu de la file PS qui est à la base des modèles développés dans cette thèse.

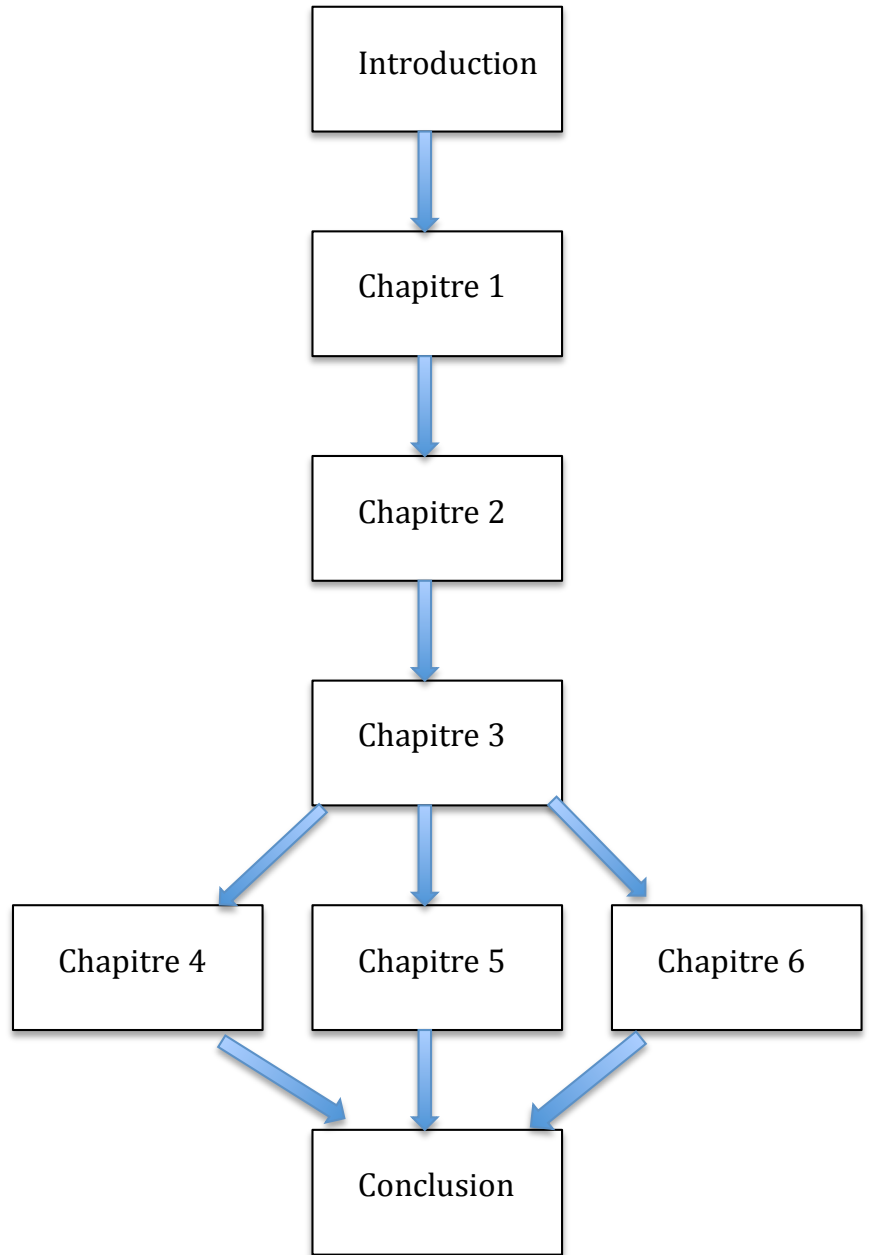
Afin d'appréhender au mieux la suite de cette thèse, le chapitre 3 propose un état de l'art de l'évaluation des performances dans les réseaux cellulaires. En premier lieu, les contributions s'appuyant sur des simulations sont étudiées et les limites inhérentes à l'utilisation de simulations sont mises en lumière. En second lieu, sont abordées les contributions basées sur la modélisation analytique. Les différents niveaux d'observation du trafic sont tout d'abord évoqués. Ensuite, des modèles analytiques existants pour des réseaux cellulaires sont présentés.

Le chapitre 4 porte sur les modèles monocellulaires à capacité constante. Ces modèles correspondent à une petite cellule abritant des utilisateurs statiques et mobiles. Les modèles proposés (le modèle Markovien et le modèle file PS) s'intéressent aux performances des utilisateurs statiques dans une telle cellule. Le modèle markovien étant un modèle exact, les résultats des deux modèles sont comparés afin de montrer la validité du modèle PS. Ces résultats sont aussi comparés à ceux obtenus par simulations afin de montrer la robustesse des hypothèses.

Le chapitre 5 présente les modèles monocellulaires à capacité variable sur la zone de couverture. Il commence par une présentation de la cellule étudiée. Ensuite le modèle PS *multiclass* est présenté. Ce modèle correspond à une macrocellule dont les conditions de transmission varient sur la zone géographique à couvrir. Les résultats obtenus permettent de quantifier l'impact de la mobilité des utilisateurs sur les performances. Ces résultats sont eux aussi comparés à ceux des simulations afin de les valider.

Le chapitre 6 propose finalement des modèles pour les réseaux hétérogènes avec différents profils utilisateurs. Le modèle présenté est un modèles à deux niveaux. Au niveau cellulaire, le modèle est une une file PS multiclass. Au niveau réseau, le modèle est une chaine de Markov absorbante qui reproduit la mobilité des utilisateurs dans les cellules du réseau. Ce modèle est ainsi capable d'évaluer instantanément les performances d'un réseaux de cellules 4G abritant des utilisateurs avec différents modèles de mobilité et différents volumes de données à télécharger.

Plan de lecture



Chapitre 1

Modélisation du système

1.1 Introduction

En introduction de cette thèse nous nous sommes attelés à présenter brièvement l'évolution des réseaux vers les technologies 4G et bientôt 5G. Nous avons pu évoquer brièvement les principales approches existantes pour résoudre des problèmes d'évaluation de performance de ces réseaux.

Avant d'évoquer dans le chapitre 3 les différents travaux de la littérature s'attaquant au problème de l'évaluation de performance dans les réseaux, nous définissons dans ce premier chapitre les bases sur lesquelles se fonde l'ensemble des modèles analytiques élaborés dans cette thèse. En premier lieu, une description du système modélisé est présentée. En second lieu, sont rassemblées les hypothèses de modélisation sur lesquelles s'appuient les modèles développés. Ces hypothèses sont discutées afin d'en justifier la pertinence.

1.2 Système étudié

Un réseau cellulaire repose sur deux sous-systèmes : le réseau d'accès radio (*Radio Access Network, RAN*) et le réseau cœur (*Core Network, CN*). Le réseau d'accès radio est proche de l'utilisateur. Il a la responsabilité de la gestion de la ressource radio et assure la connexion des équipements utilisateurs (téléphones, tablettes, ordinateurs...) avec le réseau cœur. Le réseau cœur est centralisé, il héberge des services tels que l'authentification et sert de passerelle entre le réseau de l'opérateur et le réseau téléphonique commuté (pour le domaine circuit) et Internet (pour le domaine paquet).

Dans cette thèse, nous nous intéressons particulièrement aux réseaux cellulaires de dernière génération, c'est-à-dire aux réseaux 4G et Pré-5G. Les modèles développés se focalisent sur le réseau d'accès radio. La raison est que le réseaux cœur repose sur un système filaire parfaitement capable de satisfaire toutes les contraintes liées au niveau de performance souhaité. Par conséquent, le lien radio est considéré comme étant le goulot d'étranglement. Cette hypothèse est communément admise dans la mesure où

l'infrastructure filaire est encore aujourd'hui largement surdimensionnée par rapport à l'accès radio.

Un réseau cellulaire est constitué d'un ensemble de cellules, chacune ayant une taille qui dépend de la taille de la zone géographique à couvrir, de la densité des utilisateurs et même de l'environnement. Nous parlerons dans la suite de cette thèse de petites cellules pour faire référence aux cellules dont le rayon de couverture est de quelques mètres ou dizaines de mètres, et de macrocellules pour faire référence aux cellules dont le rayon de couverture est de plusieurs centaines de mètres. Une cellule se caractérise par une Station de Base (BS) et d'un ensemble d'équipements utilisateurs présents dans la zone de couverture et pouvant initier à tout instant un transfert de données. Ce transfert prend alors la forme d'une transmission d'ondes radio entre la station de base et l'équipement utilisateur. Comme mentionné en introduction de cette thèse, la transmission d'une onde radio peut être affectée par de nombreux phénomènes physiques, notamment les phénomènes de multi-trajet et d'évanouissements du signal dans le temps, dans l'espace et en fréquence. Les conditions radio sont donc amenées à varier fortement aussi bien dans le domaine temporel que dans le domaine fréquentiel.

1.2.1 Multiplexage et codage

Afin de résister aux perturbations du canal radio, des techniques de multiplexage et de codage ont été mises au point. La technique de multiplexage la plus efficace reste l'OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). C'est aussi la technique de multiplexage utilisée dans les réseaux cellulaires de dernières générations. Il s'agit d'un procédé de codage numérique des signaux reposant sur une amélioration de la technique FDM (*Frequency Division Multiplexing*). Le principe de fonctionnement de l'OFDM consiste à partager la bande passante utilisable en un ensemble de sous-porteuses orthogonales grâce au procédé de FFT (*Fast Fourier Transform*) [8]. Cette condition d'orthogonalité implique que l'amplitude d'une sous-porteuse atteint son maximum lorsque les amplitudes de toutes les autres sous-porteuses s'annulent. Elle permet ainsi aux signaux des sous-porteuses de se superposer sans interférence entre eux. L'orthogonalité des sous-porteuses rend possible un découpage bien plus dense du domaine fréquentiel qu'en FDM (Voir figure 1.1).

Une fois la bande passante divisée en sous-porteuses, il ne reste plus qu'à transmettre les données. La transmission est numérique, il s'agit donc de transmettre une série de bits. Les bits sont regroupés afin de former des symboles binaires ou symboles OFDM de taille fixe. Il y a donc un nombre fini de symboles possibles. Par exemple une taille fixée à 2 bits par symbole conduit à quatre combinaisons possibles : 00, 01, 10 et 11. La taille d'un symbole binaire dépend de la modulation utilisée. La modulation transforme le signal numérique (suite de symboles binaires) en signal radio en faisant varier une ou plusieurs des trois grandeurs physiques associées aux ondes électromagnétiques (fréquence, amplitude et phase). Elle définit pour chaque symbole binaire l'amplitude et la phase à utiliser pour le transmettre. Envoyer un symbole binaire revient alors à modifier l'amplitude et la phase du signal transmis pendant un temps donné. La Fi-

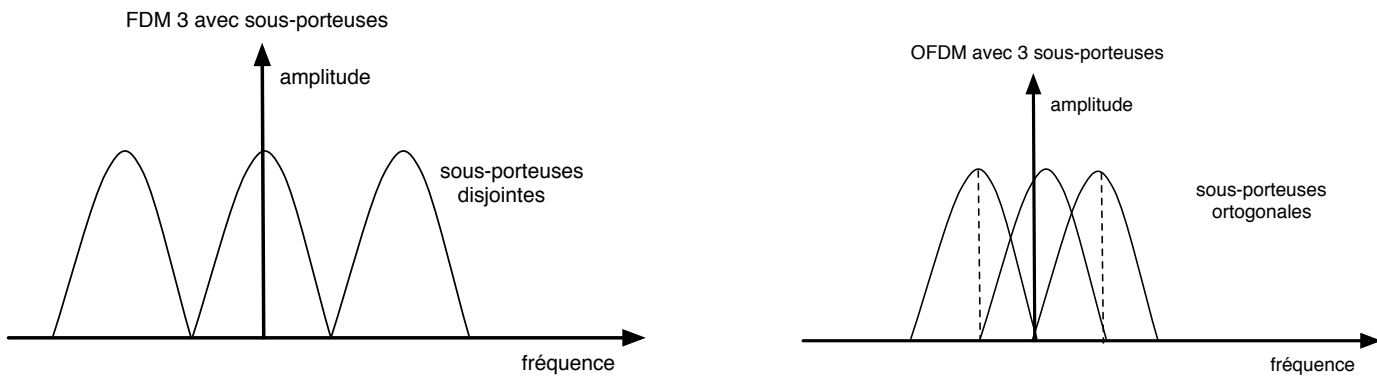


FIGURE 1.1 – Découpages FDM et OFDM du domaine fréquentiel en sous-porteuses

Figure 1.2 présente l'ensemble des combinaisons d'amplitudes et de phases associées aux différents symboles binaires lorsque la modulation 16 QAM est considérée. On appelle ce type de schéma un diagramme de constellation.

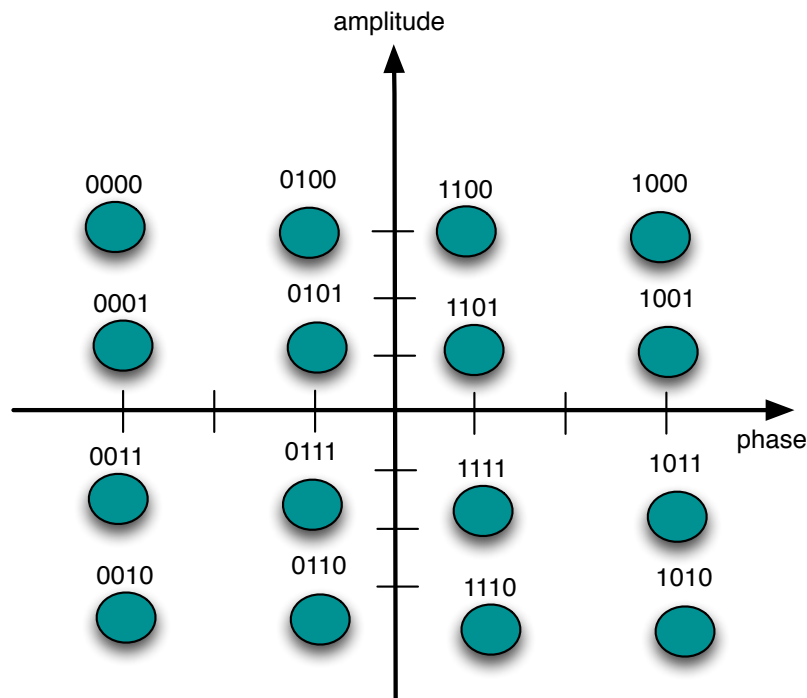


FIGURE 1.2 – Diagramme de constellation de la modulation 16 QAM .

Les symboles ainsi obtenus sont alors transmis simultanément sur les différentes sous-porteuses. La durée d'émission d'un symbole est considérée comme l'unité du découpage temporel de la ressource radio. Ces deux types de divisions permettent ainsi de découper la ressource radio en unités de ressources élémentaires à allouer par la station de base aux utilisateurs de la cellule. Signalons enfin que pour garantir l'ac-

cès concurrent à ces ressources, une technique d'accès multiple est associée au OFDM pour former le OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), qui est le mécanisme permettant de diviser la ressource radio en unités élémentaires et d'assurer l'accès à ces unités.

La transmission s'effectuant sur l'interface air, de nombreux phénomènes peuvent nuire à la qualité de la transmission radio. Afin de palier à leurs effets, l'émetteur peut jouer sur deux types de mécanismes lors du traitement du signal à transmettre ; le codage de canal et la modulation [9]. Le codage de canal est une opération consistant à coder l'information à envoyer en incluant un certain niveau de redondance. Cette redondance rend possible le contrôle d'erreur. La modulation du signal, comme nous l'avons déjà vu, transforme le signal numérique en signal radio. Le choix de la modulation a un grand impact sur l'efficacité spectrale, une mesure exprimée en bits par seconde par Hertz permettant d'évaluer la qualité du canal de transmission. Parmi les principales modulations supportées dans les réseaux cellulaires de dernière génération, on peut citer les modulations de phase QPSK et d'amplitude en quadrature 16 QAM et 64 QAM.

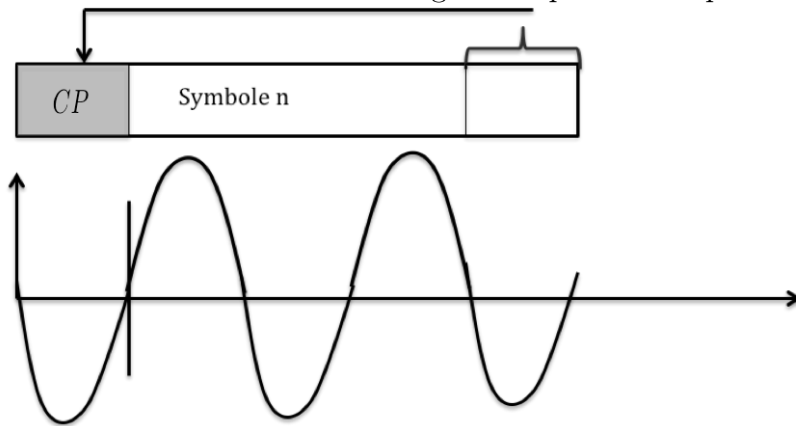
1.2.2 *Modulation and Coding Scheme* (MCS)

Le signal est donc codé avec un certain niveau de redondance, puis modulé avant d'être transmis. Le couple formé par la modulation et le schéma de codage ou *Modulation and Coding Scheme* (MCS), détermine le débit et la résistance aux erreurs de transmission et, par conséquent, l'efficacité spectrale. Le choix du MCS est donc régi par la qualité du canal radio. Un mécanisme appelé AMC (*Adaptive Modulation and Coding*) permet aux utilisateurs des réseaux 4G (LTE/LTE-A) de renégocier leur MCS. Ceci se fait à chaque milliseconde. En effet, un utilisateur transmet périodiquement un CQI (*Channel Quality Indicator*) à la station de base afin de lui indiquer la qualité du canal de communication tel que perçue. Ce rapport tient compte de plusieurs facteurs environnementaux et des perturbations, en particulier du rapport de la puissance du signal utile sur la puissance du bruit (*Signal-to-interference-plus-noise ratio* (SINR)). Rappelons qu'il est possible que les conditions radio d'un utilisateur soient si mauvaises que même le MCS le plus robuste ne lui permette pas de transmettre (ou de recevoir) de données. On parle alors d'un utilisateur en état d'*outage*.

Les utilisateurs doivent donc adapter très fréquemment leur MCS en fonction des conditions radio dans lesquelles ils se trouvent. Cette adaptation est d'autant plus fréquente que les utilisateurs sont mobiles. En effet la mobilité des utilisateurs entraîne des changements fréquents et dynamiques de position dans la cellule et même des changements de cellules. Ces changements se traduisent au niveau de la transmission de données par des variations de conditions radio et l'adaptation de MCS à utiliser pour la transmission.

1.2.3 Découpage de la ressource radio en RB

La méthode OFDM permet de diviser la bande passante en éléments de ressource ou *Resource Element* (RE), chacun formé de l'association d'une sous-porteuse avec un symbole OFDM. Ces RE sont ensuite regroupés en blocs de ressource ou *Resource Blocks* (RB). Les spécifications des interfaces radio des réseaux 4G proposent d'ajuster la taille des symboles OFDM, et plus précisément la taille des préfixes cycliques (CP) à ajoutés à chaque symbole, en fonction de l'environnement de déploiement de la cellule. Rappelons que les préfixes cycliques sont des intervalles de garde dont la durée est généralement comprise entre $1/4$ et $1/32$ de la durée du symbole OFDM. Pour former ces préfixes, la fin du symbole OFDM est recopiée au début de celui-ci, le but étant de restaurer l'orthogonalité perdue des porteuses en prolongeant le signal.



Ainsi, lorsque les conditions radio de la zone géographique à couvrir par la cellule sont défavorables, la taille des préfixes cycliques est augmentée afin de mieux résister aux interférences inter-symboles. On parle alors de préfixes étendus. En revanche, si les conditions radio de la zone géographique sont favorables, les préfixes sont plus courts.

Il est important pour la suite de remarquer deux points essentiels au sujet des RB. Le premier point est que la plus petite unité de ressource que la station de base peut allouer à un utilisateur est un multiple du RB. Le second point est que le nombre de bits transmis par groupe de RB dépend seulement du type de préfixe cyclique utilisé et du MCS. Le tableau 1.1 résume ainsi les débits théoriques en bits par paire de RB atteints en fonction des MCS selon que l'on se trouve dans une configuration avec préfixes normaux ou étendus.

1.3 Hypothèses de modélisation

Nos modèles reposent sur quelques hypothèses communes. Ces hypothèses, relatives au système, au canal radio et au trafic, sont présentées ici. Elles sont également discutées afin d'en établir leur pertinence et, si besoin est, la possibilité de les relaxer. Le détail de ces hypothèses est également l'occasion d'introduire les paramètres d'entrée des modèles ainsi que leurs notations respectives.

Modulation et Schéma de codage	débit théorique en bits par paire de RB	
	préfixe normal	préfixe étendu
QPSK 1/2	160	136
QPSK 3/4	244	208
16 QAM 1/2	328	280
16 QAM 3/4	496	424
64 QAM 1/2	496	424
64 QAM 2/3	664	568
64 QAM 3/4	748	640
64 QAM 5/6	823	712

TABLE 1.1 – Principaux MCS LTE et débits théoriques associés.

1.3.1 Canal radio

Comme nous l’avons vu, pour résister aux variations erratiques du canal radio, les équipements s’appuient sur l’adaptation dynamique de leurs MCS en fonction de leurs conditions radio.

Chaque état du canal radio d’un utilisateur correspond à un MCS donné. Nous considérons, sauf mention contraire, dans un premier temps que le canal radio d’un utilisateur n’est affecté que par sa distance à la station de base, c’est-à-dire que seul l’affaiblissement de propagation du signal (*pathloss*) est considéré. D’autres facteurs interférant sur le signal seront discutés plus tard.

1.3.2 Trafic

Les modèles que nous présentons dans cette thèse font tous l’hypothèse d’un monde ouvert, c’est-à-dire d’une population infinie d’utilisateurs pouvant arriver dans le réseau.

Les cellules des réseaux cellulaires sont prévues pour supporter une grande diversité d’applications. Le trafic généré par ces applications peut être divisé en deux catégories, d’une part le trafic temps réel, d’autre part le trafic élastique. Les modèles proposés traitent du trafic élastique dans le sens descendant. Les utilisateurs qui arrivent dans le réseau sont associés à une application qui veut télécharger un élément de données. Cet élément peut être un courriel, un fichier, une page WEB, etc. La taille de cet élément est caractérisée par une variable aléatoire Σ distribuée avec une valeur moyenne de $\bar{\Sigma}$. Nous caractérisons un téléchargement par sa taille plutôt que par sa durée car cette dernière dépend de la charge du système et des conditions radio.

1.3.3 Mobilité des utilisateurs

La mobilité des utilisateurs est un enjeu majeur dans les réseaux cellulaires. En effet, le déplacement d’un utilisateur s’accompagne en général d’un changement de ses conditions radio et donc de l’adaptation du MCS à utiliser pour la transmission. Divers

modèles de mobilité des utilisateurs ont été proposés. Ces modèles se regroupent en deux catégories principales : les modèles géométriques qui représentent explicitement les chemins aléatoires de déplacement des utilisateurs dans le plan et les modèles non spatiaux dans lesquels la mobilité est simplement modélisée en supposant que les utilisateurs en mouvement sautent entre des zones de conditions de transmission distinctes. Le modèle de mobilité que nous considérons dans nos modèles se rapproche de la seconde catégorie. En effet, la mobilité d'un utilisateur est prise en compte au travers de la moyenne de temps que cet utilisateur utilise chaque MCS disponible dans le système.

1.3.4 Politiques d'allocation

La manière dont les RB disponibles sont distribués par la station de base aux différents équipements utilisateurs à chaque intervalle de temps est définie par la politique d'allocation. S'il existe de nombreuses politiques, aucune n'est pourtant recommandée dans les documentations des technologies 4G. Le choix d'une politique d'allocation revient entièrement aux opérateurs, et une politique d'allocation n'est préférable à une autre que selon les objectifs à atteindre. Ces objectifs peuvent être regroupés en deux grandes catégories : maximiser l'utilisation de la ressource, ou maximiser l'équité entre les utilisateurs. Nous considérons que la station de base partage les ressources à chaque intervalle de temps équitablement entre les utilisateurs qui en font la demande. La station de base ne fait donc aucun favoritisme en fonction du MCS et privilégie ainsi l'équité en ressources entre les utilisateurs au détriment de l'efficacité d'utilisation de la ressource. Elle peut être mise en œuvre par une simple politique cyclique telle que le *Round Robin*.

1.4 Synthèse

Au cours de ce chapitre, nous avons abordé les nombreuses notions intervenant dans le développement de nos modèles analytiques. Pour conclure ce chapitre de présentation, récapitulons les points essentiels à la compréhension de l'ensemble des modèles présentés dans ce rapport et de leurs intérêts.

Systeme étudié

Nous avons commencé par présenter les principaux éléments des réseaux cellulaires. Puis nous avons porté notre attention sur le réseaux d'accès qui est le maillon faible des réseaux cellulaires en terme de performance.

Le réseau d'accès des nouvelles générations de réseaux cellulaires se base sur OFDM pour diviser la ressource radio à la fois dans les domaines fréquentiel et temporel. Il s'appuie en suite sur des variantes d'OFDMA pour distribuer ces ressources aux utilisateurs. Il s'agit de groupes de Ressources Bloc pour le LTE. Afin de palier à la forte variation du canal radio due à l'utilisation de large bande de fréquence, la station

de base et les utilisateurs s'accordent pour adapter régulièrement le MCS utilisé. Cette action est d'autant plus fréquente que les utilisateurs sont mobiles. La station de base partage les unités de ressources disponibles à intervalles réguliers dont la durée est d'une milliseconde pour le LTE. Ce partage est effectué selon une politique d'allocation. Toutefois, aucune politique n'est préconisée dans la documentation du LTE. Le nombre de bits pouvant être transmis au moyen d'une unité de ressource ne dépend que du MCS utilisé. De ce fait, les MCS attribués à un utilisateur et la durée de ces attributions suffisent donc à estimer son débit. Précisons dès à présent que ce point joue un rôle capital dans nos modèles.

Principales hypothèses de modélisation

Nous nous sommes ensuite intéressés aux différentes hypothèses sur lesquelles sont basés nos modèles. Nous nous sommes intéressés notamment au cas d'un réseaux soumis au trafic élastique. Nous avons présenté le modèle de mobilité que nous considérons. Ce modèle de mobilité est un modèle de haut niveau, permettant d'adapter les modèles développés à différents types de mobilités réelles des utilisateurs.

Chapitre 2

Les files Processor Sharing

2.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les principaux éléments des files d'attente. Nous rappelons ensuite quelques résultats importants des files d'attente *Processor Sharing* (PS) qui sont à la base des modèles que nous présenterons au cours des chapitres suivants.

2.2 Les files d'attente

De manière générale le formalisme de files d'attente permet de modéliser de manière assez simple le phénomène de partage de ressources. Une file d'attente est basée sur deux entités, client et serveur. Un client qui arrive dans le système entre dans une file en attente d'un service de la part du serveur, reçoit le service puis se dirige vers une autre file ou quitte le système. Si dans le système le client attend plusieurs services, on parle de réseau de files d'attente. Ce formalisme est très utilisé pour modéliser des systèmes de la vie quotidienne tels que les guichets de cinémas, les caisses de supermarchés, le trafic urbain ou aérien, les systèmes informatiques, les réseaux téléphoniques etc.

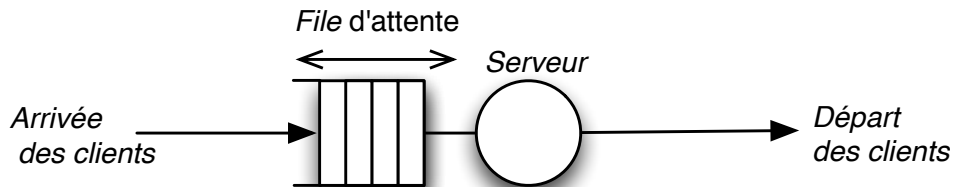


FIGURE 2.1 – Une file simple

Pour caractériser complètement une file d'attente, on doit spécifier le processus d'arrivées des clients, la capacité de la file et la discipline de service.

2.2.1 Processus d'arrivée

L'arrivée des clients dans la file est décrite par un processus stochastique de comptage. La plupart du temps, l'arrivée des clients à une file est décrite par un processus de renouvellement. Rappelons qu'un processus de comptage est un processus de renouvellement si et seulement si les variables aléatoires mesurant les temps d'inter-arrivées sont des variables aléatoires indépendantes et identiquement distribuées. La loi décrivant le temps d'inter-arrivée suffit alors à caractériser le processus de renouvellement. Le processus d'arrivée le plus simple à étudier et le plus employé est le processus de Poisson. C'est une loi dont le paramètre noté λ est égal au nombre d'arrivées de clients dans le système par unité de temps. Cette loi caractérise un processus de renouvellement qui est tel que les inter-arrivées sont distribuées selon une loi exponentielle.

2.2.2 Capacité de la file

La capacité d'une file d'attente représente le nombre maximum de clients pouvant être présents dans la file à un instant donné. Si ce nombre est illimité, tout client qui arrive trouve une place dans la file. En revanche lorsque ce nombre est limité, un client qui arrive et trouve la file pleine n'accède pas au système.

2.2.3 Temps de service

Le temps de service est la durée pendant laquelle un client est en service. Dans le contexte de réseaux cellulaires, cela correspond à la durée d'une transmission pour le trafic temps réel ou au temps passé dans le réseau avant de compléter un transfert de données pour le trafic élastique. La distribution du temps de service la plus couramment employée est la distribution exponentielle. Cependant, la propriété sans mémoire de la loi exponentielle fait que celle-ci n'est généralement pas très réaliste pour modéliser des phénomènes réels.

Discipline de service

La discipline de service détermine l'ordre dans lequel les clients sont rangés dans la file et y sont retirés pour être servis. Les disciplines de service les plus courantes sont :

- FIFO (*First In First Out*) : c'est la discipline dans laquelle les clients sont servis dans l'ordre d'arrivée.
- LIFO (*Last In First Out*) : avec cette discipline dans laquelle les clients sont servis suivant le principe d'une pile. C'est-à-dire, le dernier client arrivé (donc posé au-dessus de la pile) sera le premier à être servi.
- RANDOM (*Aléatoire*) : ici le prochain client qui sera servi est choisi aléatoirement dans la file d'attente.
- *Round-Robin* (Cyclique) : tous les clients de la file d'attente entrent en service à tour de rôle, effectuent une portion de leur temps de service et sont replacés dans

la file, jusqu'à ce que leur service soit accompli. Cette discipline a été introduite afin de modéliser les systèmes informatiques.

- PS (*Processor Sharing*) : c'est le cas limite de la discipline *Round-Robin* lorsque le temps entre deux cycles tend vers 0. Tous les clients sont servis en même temps, mais avec une vitesse inversement proportionnelle au nombre de clients simultanément présents. Par exemple, si la capacité d'une station de base (débit de transmission) est de C et qu'à un instant donné il y a n client dans la cellule, tous les clients sont servis simultanément avec un débit $\frac{C}{n}$.

2.3 File PS

Les files d'attentes PS, ont été introduites par Kleinrock [10, 11] et sont d'un intérêt considérable pour l'étude des systèmes informatiques et de télécommunications. Les caractéristiques remarquables de ces files sont sa simplicité et sa propriété d'insensibilité à la distribution du temps de service. Selon cette propriété, la distribution stationnaire de l'état de la file d'attente ne dépend pas de la loi des temps de service, mais uniquement de leur moyenne.

En effet, considérons une cellule approximée par un disque de rayon R comme sur la figure 2.2. La station de base est supposée être au centre du disque. Les nouvelles demandes de transfert de données des utilisateurs arrivent dans la cellule suivant un processus de Poisson d'intensité λ . Les utilisateurs de la cellule souhaitent télécharger un fichier donc la taille est une variable aléatoire notée Σ et distribuée suivant une loi exponentielle et de moyenne $\mathbb{E}(\Sigma) = \bar{\Sigma}$. La capacité de transmission dans la station de base est C .

Les utilisateurs sont tous statiques et uniformément distribués sur le disque. Si la station de base attribue les ressources aux utilisateurs qui en font la demande suivant la discipline de service PS ou même Round-Robin, alors l'occupation de la cellule peut être modélisée par une file d'attente PS.

2.3.1 File PS simple

Supposons dans un premier temps que la capacité de transmission de la station de base est constante sur toute la zone de couverture de la cellule.

L'occupation de la cellule peut être représentée par une file PS (voir figure 2.3) de taux d'arrivées des clients dans la file égal au taux λ d'arrivées des utilisateurs dans la cellule et de taux de service μ , où $\frac{1}{\mu}$ est le temps de service (sans partage) d'un utilisateur dans la cellule.

$$\mu = \frac{C}{\bar{\Sigma}}. \quad (2.1)$$

La charge de cette file est donnée par :

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{\lambda \bar{\Sigma}}{C}. \quad (2.2)$$

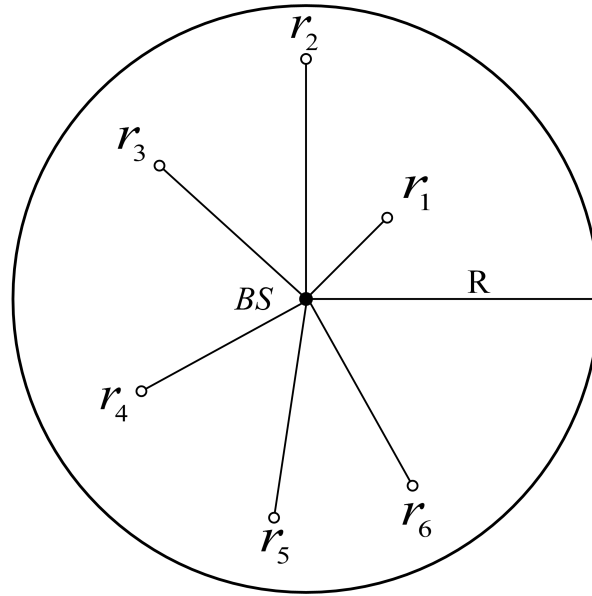


FIGURE 2.2 – Exemple d’une cellule à capacité variable sur la zone de couverture

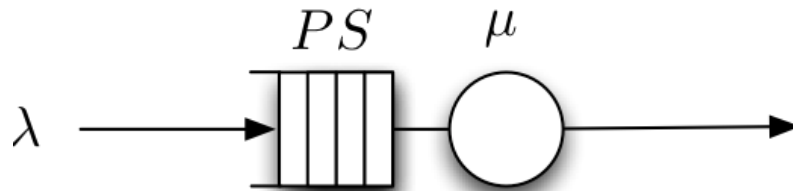


FIGURE 2.3 – File PS simple

Notons par $X(t)$ le nombre de transmissions en cours à un instant t . $X(t)$ est une chaîne de Markov Irréductible de mesure stationnaire π . La condition de stationnarité de cette chaîne est : $\rho < 1$.

À un état x de la chaîne, les utilisateurs présents dans la cellule obtiennent chacun un débit C/x . le débit moyen d’un utilisateur dans la cellule est donc :

$$\bar{\gamma} = \frac{C\rho}{\mathbb{E}(X)} \quad (2.3)$$

où $\mathbb{E}(X)$ est le nombre moyen d’utilisateurs dans la cellule.

La distribution stationnaire de $X(t)$ est :

$$\pi(x) = (1 - \rho)\rho^x. \quad (2.4)$$

On déduit de 2.4 le nombre moyen d’utilisateurs dans la cellule :

$$\mathbb{E}(X) = \frac{\rho}{1 - \rho}. \quad (2.5)$$

Au vu de 2.3, le débit moyen d'un utilisateur dans la cellule est donc :

$$\bar{\gamma} = C(1 - \rho). \quad (2.6)$$

D'après la loi de Little, le temps moyen \bar{R} de séjour d'un utilisateur dans la cellule est égal au nombre moyen d'utilisateurs dans la cellule $\mathbb{E}(X)$ divisé par le débit moyen de sortie des utilisateurs de la file. D'après la loi de concertation de travail, ce débit moyen de sortie des utilisateurs de la file es égal au taux d'arrivées λ des utilisateurs dans la file. Dès lors \bar{R} est donné par :

$$\bar{R} = \frac{\mathbb{E}(X)}{\lambda} \quad (2.7)$$

2.3.2 File PS multiclasse

Considérer que la capacité de la cellule est constante sur toute sa zone de couverture est une hypothèse acceptable pour les petites cellules telles que les *microcells*, *picocells* et *femtocells* dont la zone à couvrir est de l'ordre de quelques mètres ou dizaines de de mètres. Cette hypothèse n'est plus acceptable pour les *macrocells* qui couvrent plusieurs centaines de mètres. Nous considérons dans cette section que la capacité de transmission d'un utilisateur dans la cellule est fonction de sa distance r_i à la station de base. La capacité de transmission d'un utilisateur placé à une distance r_i de la station de base est donc notée C_{r_i} . Un utilisateur qui arrive dans la cellule a une probabilité p_i d'être à une distance r_i de la station de base.

L'occupation de la cellule peut être représentée par une file PS muliclasse avec n classes, chaque classe correspondant à une distante possible r_i entre la station de base et un utilisateur de la cellule(voir figure 2.4). Le taux d'arrivées des clients dans la file i est égale à

$$\lambda_{r_i} = p_i \lambda, \quad i = 1, \dots, n, \quad (2.8)$$

et le taux de service des utilisateurs de cette file est égale à

$$\mu_{r_i} = \frac{C_{r_i}}{\Sigma}, \quad i = 1, \dots, n. \quad (2.9)$$

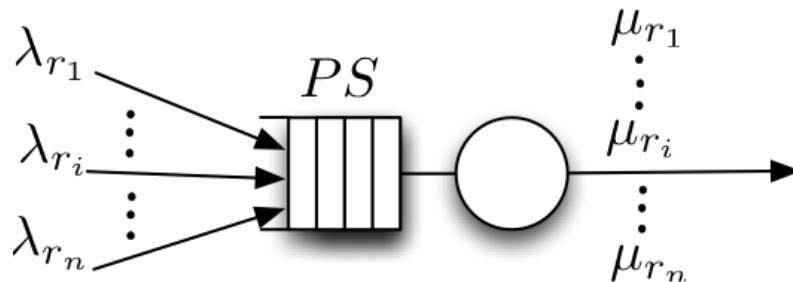


FIGURE 2.4 – File PS multiclasse à n classes

La charge de la file i est dès lors donnée par :

$$\rho_{r_i} = \frac{\lambda_{r_i}}{\mu_{r_i}}, \quad (2.10)$$

la charge totale de la cellule est donc la somme des charges des files :

$$\rho = \sum_{i=1}^n \rho_{r_i}. \quad (2.11)$$

Ce système atteint son régime stationnaire si et seulement si : $\rho < 1$

Le nombre de transmission en cours $X(t)$ dans la cellule à un instant t est un vecteur à n -dimensions où la composante i correspond à la taille de la file i à l'instant t . $X(t)$ est un processus de Markov irréductible. À un état quelconque x du processus tel que $x_{r_i} > 0$ chaque utilisateur de la cellule placé à la distance r_i de la station de base a un débit $C_{r_i} \phi_{r_i}(x) / x_{r_i}$ où $\phi_{r_i}(x)$ est la proportion de temps que la station de base accorde aux utilisateurs placés à la distance r_i . Le débit moyen $\bar{\gamma}_{r_i}$ des utilisateurs à une distance r_i de la station de base est donc :

$$\bar{\gamma}_{r_i} = \mathbb{E}\left(\frac{C_{r_i} \phi_{r_i}(X)}{X_{r_i}}\right) = \frac{\mathbb{E}(C_{r_i} \phi_{r_i}(X))}{\mathbb{E}(X_{r_i})}, \quad (2.12)$$

où $\mathbb{E}(X_{r_i})$ est le nombre de clients dans la file i . D'après l'équation de conservation de trafic,

$$\lambda_{r_i} = \mathbb{E}(\mu_{r_i} \phi_{r_i}(X)) \quad (2.13)$$

on déduit :

$$\bar{\gamma}_{r_i} = \frac{\lambda_{r_i} \bar{\Sigma}}{\mathbb{E}(X_{r_i})}. \quad (2.14)$$

La distribution stationnaire de $X(t)$ est donné par :

$$\pi(x) = (1 - \rho) \binom{\sum_i x_i}{x_1, \dots, x_n} \rho_1^{x_1} \dots \rho_n^{x_n}. \quad (2.15)$$

On déduit de 2.15 que le nombre moyen d'utilistaeurs de la file i correspondant au nombre moyen d'utilistaeurs placés à la distance r_i de la station de base est :

$$\mathbb{E}(X_i) = \frac{\rho_{r_i}}{1 - \rho} \quad (2.16)$$

Au vu de 2.14, le débit moyen obtenu par un utilisateur placé à la distance r_i de la station de base est donné par :

$$\bar{\gamma}_{r_i} = C_{r_i} (1 - \rho). \quad (2.17)$$

D'après la loi de Little, le temps moyen de séjour d'un utilisateur placé à la distance r_i est donc :

$$\bar{R}_{r_i} = \frac{\mathbb{E}(X_{r_i})}{\lambda_{r_i}}. \quad (2.18)$$

2.4 Synthèse

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques résultats des files d'attente. Nous avons notamment présenté les files PS simple et multiclassées qui sont à la base des modèles développés au cours de cette thèse. Ces résultats illustrent bien l'insensibilité des files PS à la nature de la distribution de la taille des requêtes. Que ce soit pour une file PS simple ou une file PS multiclassée, la distribution stationnaire du nombre de clients dans la ou les file(s) ne dépend pas de la distribution de la taille des requêtes ; mieux encore, elle dépend uniquement du facteur de charge global ρ de la cellule.

Chapitre 3

Analyse de performance des réseaux cellulaires

3.1 Introduction

Afin d'utiliser de façon satisfaisante les réseaux cellulaires 4G actuels et les réseaux cellulaires 5G à venir, il est obligatoire de pouvoir évaluer leurs performances. Nous avons vu que les approches possibles peuvent être classées en trois catégories distinctes : l'expérimentation sur des réseaux existants, les simulations et la modélisation analytique. Si la première n'est clairement pas recommandée pour des raisons financières évidentes, de nombreux travaux se basant sur des simulations ou des modèles analytiques ont été menés. Nous proposons ici de porter notre attention sur les publications résultant de ces travaux. Bien sûr, nous nous limiterons à celles s'avérant intéressantes pour le sujet de cette thèse.

Ce deuxième chapitre propose donc un état de l'art fourni de l'évaluation des performances dans les réseaux cellulaires. Dans un premier temps, nous étudierons les contributions s'appuyant sur des simulations. Ce point sera également l'occasion de mettre en lumière les limites inhérentes à l'utilisation des simulations. Dans un second temps, nous présenterons les études reposant sur la modélisation analytique. Nous commencerons par aborder les différentes manières de modéliser le trafic. Nous évoquerons ensuite les modèles analytiques proposés pour des réseaux cellulaires en général puis ceux prenant spécialement en compte la mobilité des utilisateurs. Finalement, nous conclurons sur la nécessité de développer des modèles analytiques adaptés aux réseaux cellulaires de dernières générations, capables de répondre à des problèmes complexes d'estimation de performance des ces réseaux.

3.2 Simulations

La simulation de réseau est la méthodologie la plus naturelle et communément utilisée pour évaluer différentes topologies de réseaux sans déploiement réel de ces réseaux.

Les simulateurs de réseaux sont largement utilisés par le milieu de la recherche pour évaluer de nouvelles théories et hypothèses mais également par les industriels pour évaluer la conformité des équipements et services. Nous présentons dans cette section un aperçu des études ayant choisi cette approche. Tout d'abord, nous nous intéresserons aux études portant sur les couches physique et MAC. Nous présenterons par la suite des publications s'étant intéressées aux simulations niveau système ou réseau. Nous ferons ensuite un point sur le choix du simulateur à utiliser. Enfin, nous finirons par un point sur les limites des simulations.

3.2.1 Interface radio

Yeung, Takai, Bagrodia, Mehrnia et Daneshrad [12] simulent d'une manière détaillée les changements des conditions radio perçus par les systèmes sans fil reposant sur la technique de multiplexage OFDM. Les simulations présentées mettent en évidence la dépendance entre la rapidité des variations de la qualité du canal et la bande de fréquences considérée. Ces résultats montrent que l'utilisation d'une bande de fréquences larges entraîne d'importantes variations de la qualité du canal radio et ce sur des échelles de temps assez courtes.

Josep Colom Ikuno, Martin Wrulich, Markus Rupp ont proposé dans [13] et [14] des simulateurs pour les réseaux LTE. Le premier simulateur se focalise sur la couche physique alors que le second est un simulateur système. Les auteurs insistent sur l'influence de l'environnement de propagation du signal radio sur la modulation et le codage utilisés, et donc sur la qualité de service rendu aux utilisateurs. Ceci permet de souligner l'importance majeure du mécanisme d'adaptation de la modulation et du codage à utiliser lors d'une transmission de données, (voir chapitre 1) mis en œuvre dans les réseaux LTE/LTE-A et dans d'autres systèmes de communication sans fil. Nos modèles s'appuient sur ce mécanisme.

Gómez, Morales-Jiménez, Sánchez-Sánchez et Entrambasaguas [15], mais également Mehlführer, Wrulich, Ikuno, Bosanska et Rupp [16], ont eux aussi développé des simulateurs se focalisant sur la couche physique de la technologie LTE et son mécanisme de MIMO. Ces simulateurs permettent d'estimer l'influence de la topographie de la zone géographique sur laquelle s'étend la cellule considérée sur les conditions radio. Les résultats obtenus confirment la très forte variabilité du canal radio et la nécessité de changer très souvent de MCS. Notons cependant que si les simulateurs proposés sont capables de simuler des systèmes sans fil complexes, ils ne prennent pas en compte les comportements des utilisateurs en termes d'utilisation des ressources. En effet, ces derniers sont supposés utiliser la ressource en continu avec un débit constant.

Frank, Müller et Speidel [15] étudient le mécanisme de MIMO mis en œuvre dans le LTE-A. Les auteurs proposent une méthode permettant, lorsque le MIMO est utilisé, d'améliorer l'utilisation des signaux de références employés afin que l'eNodeB soit informé avec plus de précision des conditions radio des utilisateurs. Cette méthode repose sur la définition de vecteurs quantitatifs permettant aux utilisateurs de rapporter à l'eNodeB les éventuelles interférences qu'ils perçoivent. Le but est bien sûr de faciliter

l'adaptation des MCS des utilisateurs en fonction des conditions radio observées. Des simulations extensives sont menées afin d'évaluer l'efficacité de la méthode proposée. Les résultats montrent des gains intéressants sur les performances. Signalons toutefois que les auteurs ne prennent pas en compte l'impact de la signalisation additionnelle lors des scénarios où les utilisateurs ont des conditions radio plutôt favorables.

Ces études soulignent la nécessité pour les systèmes tels que le LTE/LTE-A s'appuyant sur de larges bandes de fréquences d'adapter fréquemment leurs MCS pour faire face à des variations des conditions radio. Ces résultats confirment l'importance et la nécessité de prendre en compte les changements fréquents de MCS dans notre approche.

3.2.2 Algorithmes et protocoles

Nihtilä Timo, Tykhomyrov Vitaliy, Alanen Olli, Uusitalo Mikko A, Sorri Antti, Moisio Martti, Iraj Sassa, Ratasuk Rapeepat et Mangalvedhe Nitin [17] mais également Ratasuk Rapeepat, Mangalvedhe Nitin et Ghosh Amitava [18] analysent les performances du LTE déployé dans les bandes de fréquences libres en coexistence avec d'autres systèmes tel que le WIFI. C'est la technologie *Licensed Assisted Access* (LAA) décrite dans la *release 13* du LTE. Plus précisément ces auteurs s'intéressent respectivement à l'utilisation de LAA en tant que canal supplémentaire de transmission de données en liaison descendante et au mécanisme de partage de la bande passante à utiliser pour permettre aux deux technologies de transmettre. Ce mécanisme rend effectivement possible l'utilisation du LTE dans des bandes de fréquences libres toutefois sans dégrader significativement les systèmes déjà présents sur cette bande. Les résultats montrent une nette amélioration des performances du LTE lorsque le LAA est utilisé que ce soit comme liaison supplémentaire ou en remplacement de la liaison LTE dans une bande de fréquence non libre. Par ailleurs les auteurs soulignent la nécessité du mécanisme *listen-before-talk* dans le cas d'un déploiement multi-opérateurs dans la même bande de fréquence.

Kassab Mohamed, Bonnin Jean-Marie et Mahdi Mohamed [19] mesurent les effets des handovers sur les performances des utilisateurs dans des réseaux cellulaires hétérogènes WiFi-WiMAX. Pour ce faire, les auteurs ajoutent un module spécifique à WiMAX au simulateur SimulX [20] consacré à la technologie WiFi. Les résultats des simulations montrent que les délais induits par les handovers ont d'importantes répercussions négatives sur les performances des applications temps réel. L'importance de raccourcir ces délais est ensuite soulignée. Sousa, Pentikousis et Curado [21] s'intéressent eux aussi aux handovers dans les réseaux hétérogènes comprenant des cellules WiMAX. Les auteurs se focalisent sur leur impact sur les performances des applications multimédia. Ils proposent d'étudier les résultats obtenus grâce à la plateforme de simulation ns-2 et à son module WiMAX [22] gérant la mobilité développé par l'institut NIST [23]. Ces résultats concordent avec ceux présentés par Kassab, Bonnin et Mahdi. En effet, de nombreux paquets sont perdus à chaque handover, dégradant ainsi les performances. Pour pallier ce problème, l'utilisation du mécanisme *Media Independent Handover* (MIH) défini par le standard IEEE 802.21 est préconisée. Ce mécanisme rend effectivement possible les

échanges d'informations entre interfaces sans fil reposant sur différentes technologies dans le but de faciliter les handovers à travers des réseaux hétérogènes. Ces études illustrent l'importance d'étudier la probabilité de handover, ce qui a été fait dans nos modèles.

Sayenko Alexander, Alanen Olli et Hämäläinen Timo [24] ainsi que Hou Fen, Ho Pin-Han et Shen Xuemin Sherman [25] présentent des politiques d'équité proportionnelle, ou *Proportional Fairness*, adaptées à la technique de multiplexage OFDM. Ce type de politiques revient à servir chaque utilisateur avec une priorité dépendant de ses conditions radio et de la proportion de ressources déjà reçue pendant un intervalle de temps donné. Ainsi, il est possible de tirer partie des variations du canal radio tout en assurant aux utilisateurs un service minimum. Notons cependant que ces études ne fournissent aucun moyen pour fixer les priorités. Pourtant, définir ces priorités est un problème non trivial. Effectivement, si les utilisateurs avec de bonnes conditions radio sont trop avantagés, les autres risquent de ne pas avoir assez accès aux ressources. Et si à l'inverse les utilisateurs avec de bonnes conditions radio ne sont pas assez avantagés, la politique perd tout son intérêt.

Sadiq Bilal, Madan Ritesh et Sampath Ashwin [26] s'intéressent eux aussi aux politiques d'allocation de ressources mais cette fois dans les cellules LTE, et proposent un algorithme. Les auteurs de ces travaux proposent d'allouer la ressource aux connexions en fonction de leurs classes de service. L'algorithme d'allocation proposé réalise la distribution des ressources en deux phases. La première phase consiste à prédire les débits d'émission des différents utilisateurs en fonction de l'historique des MCS précédemment utilisés. La seconde phase consiste à allouer les ressources en fonction des prédictions de l'évolution du SINR et donc du MCS et des demandes en QoS. Les connexions appartenant aux classes avec débits garantis sont privilégiées. De nombreux scénarios sont simulés afin de vérifier l'intérêt de la politique conçue par les auteurs. Les résultats obtenus montrent un phénomène assez intéressant : dans la plupart des scénarios testés, les meilleures performances sont atteintes lorsque des priorités strictes sont imposées entre les différentes classes.

3.2.3 Limites des simulations

L'évaluation de performance basée sur des simulations n'est pas simple à mettre en œuvre. En effet, la création d'un simulateur est un procédé laborieux et couramment sujet à erreur à cause du nombre de détails qu'elle doit prendre en compte. De plus, la difficulté liée au choix du simulateur adapté, les temps de calculs potentiellement longs et l'interprétation des résultats obtenus, rendent les études reposant sur des simulations particulièrement fastidieuses [27]. La simulation de réseaux sans fil reprend l'ensemble de ces obstacles, auxquels s'ajoutent de nombreuses interrogations sur l'évolution de la qualité du canal radio dans le temps, l'impact de la mobilité des utilisateurs, etc. En fait, il y a une forte dépendance entre l'environnement dans lequel ces réseaux sont déployés et l'implémentation de leur couche physique, due aux phénomènes de propagation du signal. Les simulateurs de réseaux sans fil sont donc obligés d'intégrer la prise en compte

des nombreux phénomènes de propagation, propres à chaque environnement, tout en gardant la complexité de calcul à un niveau acceptable. Le niveau de détail à considérer pour les simulations est donc un point crucial. Trop de détails entraîne des temps de calculs excessifs et des simulateurs très lourds. S'il n'y en a pas assez, c'est la validité des résultats obtenus qui n'est plus garantie. Enfin, les standards régissant les technologies sans fil évoluant très rapidement, les résultats de simulations obtenus avec trop de détails deviennent incertains sur le long terme.

Les simulations spécifiques aux réseaux cellulaires 4G/5G rencontrent donc bien des difficultés auxquelles s'ajoute la complexité des interfaces radio, comme en témoignent les quelques travaux présentés ici. Effectivement, bien qu'offrant des résultats intéressants, ces derniers se limitent souvent à des aspects très spécifiques des standards. Précisons enfin que la simulation constitue un bon moyen de vérifier la validité des modèles analytiques.

3.3 Modélisation analytique

Le développement des modèles analytiques est une alternative intéressante aux simulations pour la modélisation et l'évaluation des performances des réseaux. La plupart des travaux de modélisation analytique disponibles dans la littérature sont basés sur la théorie des files d'attente et les modèles markoviens qui en découlent. Dans cette section, nous évoquerons les travaux se focalisant sur la modélisation du trafic, puis ceux portant sur l'étude de la mobilité dans les réseaux, et enfin nous aborderons la modélisation des réseaux cellulaires. Régulièrement, nous soulignerons la pertinence des différentes contributions quant à notre objectif de modélisation et d'évaluation de réseaux cellulaires de dernières générations.

3.3.1 Modélisation du trafic

Le trafic dans les réseaux cellulaires actuels et futurs est particulièrement diversifié. Nous abordons ici les méthodes permettant de modéliser ce trafic. Nous commençons par présenter les différents niveaux possibles d'observation du trafic. Nous abordons ensuite brièvement le cas du trafic temps réel et traitons du trafic élastique.

Échelles d'observation du trafic

Le travail de développement d'un modèle analytique se doit d'être précédé du choix du niveau d'observation du trafic. Ce choix se fait en fonction des informations que l'on souhaite obtenir concernant le trafic. Le trafic peut être observé à trois niveaux distincts [28] .

- Niveau paquet. Chaque paquet est considéré et traité séparément des autres. Le traitement du trafic à ce niveau peut être une tâche particulièrement ardue, car on note une grande variation au niveau de la taille et la priorité des paquets en

fonction des applications considérées. De plus, dans le cas de trafic élastique, il y a une forte corrélation entre les arrivées des paquets dans le système observé. Ce point proscrit alors la possibilité de faire l'hypothèse d'arrivées poissonniennes, compliquant fortement la modélisation.

- Niveau flot. Un flot peut être défini par une rafale ou *burst* de paquets empruntant souvent le même chemin dans le réseau. Selon le trafic étudié, un flot peut correspondre à quelques secondes de streaming ou encore au transfert d'une partie d'un document. Cette approche semble déjà beaucoup plus naturelle car elle permet de faire une abstraction en considérant uniquement la taille moyenne des données auxquelles correspond le flot.
- Niveau session. Une session, tout comme un flot, n'a pas de définition stricte. Cependant, elle est souvent considérée comme une succession de flots émanant d'une même source sur une période d'activité. La session est supposée terminée après un certain temps d'inactivité. Ce niveau d'observation est intéressant dans la mesure où il permet entre autres d'obtenir le nombre d'utilisateurs actifs dans le réseaux à chaque instant à travers le nombre de connexions en cours. Notons cependant que si les niveaux flot et session sont les approches qui paraissent les plus cohérentes, il n'est toutefois pas possible dans certains cas d'éviter le niveau paquet. En effet, lorsque des applications temps réel sont considérées par exemple, il devient impératif de pouvoir contrôler des paramètres de performances tels le délai moyen d'acheminement d'un paquet, ou encore la probabilité de rejet d'un paquet.

Trafic temps réel

Les applications générant du trafic temps réel sont nombreuses, on peut citer notamment la téléphonie et le *streaming*. Ce type de trafic est sujet à une forte contrainte de temps. Ceci conduit souvent à servir les connexions temps réel en émulant un mode circuit. Les connexions peuvent donc être aisément caractérisées par leur durées car ces dernières sont indépendantes de la charge du réseau. Par conséquent, de nombreuses publications (y compris [29, 30, 31]) préconisent de supposer un mode circuit pour modéliser le trafic temps réel et ce y compris dans les réseaux à commutation de paquets.

Les modèles résultant sont en général des variantes des célèbres modèles d'Erlang [32] et Engset [33]. Ces modèles ont été proposés au début du XX^e siècle afin de modéliser les réseaux téléphonique à commutation de circuits. Plus précisément, ils ont été conçus à l'origine pour modéliser le comportement des appels dans un commutateur téléphonique disposant de C circuits, ne pouvant donc gérer que C connexions simultanément. Notons que si les deux modèles font la même hypothèse au niveaux du partage des ressources, ils sont tout de même très différents. En effet, le modèle d'Erlang suppose une population d'utilisateurs suffisamment grande pour que les arrivées des demandes de connexion suivent un processus de Poisson. De plus, le Modèle d'Erlang se décline sous deux versions. La première traite des cas où le commutateur doit refuser une demande de connexion s'il n'y pas assez de ressources pour la satisfaire immédiatement (Erlang-B).

La deuxième considère le cas où le commutateur met en attente les nouvelles demandes de connexion lorsqu'il a déjà atteint le maximum de connexions pouvant être servies simultanément. Le modèle d'Engset, quant à lui, repose sur l'hypothèse d'une population finie d'utilisateurs. Les arrivées des demandes de connexions ne sont donc plus poissonnienne, puisque leur fréquence diminue à mesure que le nombre de connexions en cours augmente.

Plus important, les modèles Erlang et Engset partagent une propriété particulièrement intéressante : ils établissent l'insensibilité des modèles aux distributions de temps de service [34, 35]. Par conséquent, les durées des appels n'ont pas besoin d'être réparties suivant une distribution particulière pour valider les résultats. Seules leurs valeurs moyennes sont nécessaires pour modéliser un réseau. Ceci explique largement le succès de ces modèles, à la fois simples et robustes, utilisée encore aujourd'hui malgré le profond bouleversement qu'ont connu la technologie et les usages de la téléphonie.

Trafic élastique

Modéliser le trafic en mode circuit est donc un exercice parfaitement maîtrisé. En revanche, la modélisation du trafic élastique est plus ardue. En effet, ce type de trafic correspond à des transferts dont les durées dépendent directement de l'évolution des conditions de services et de la charge du réseau. La solution la plus adéquate est de caractériser les transferts élastiques par leurs tailles plutôt que leurs durées.

Les travaux de Taqqu Murad S, Willinger Walter et Sherman Robert [36] mais également de Meo Michel et Marsan Marco Ajmone [37] ont montré que les distributions exponentielles des variables aléatoires régissant les tailles des transferts élastiques n'étaient pas les plus adaptées pour saisir au mieux la nature élastique du trafic. Cela a soulevé un véritable problème car la propriété sans mémoire propre aux distributions exponentielles est très utile pour la modélisation analytique. Pour contourner ce problème, les regards se sont tournés vers la discipline de service *Processor Sharing* (PS) et la propriété d'insensibilité des files qui en découle. Cette propriété énonce effectivement que les variables aléatoires utilisées n'influent sur les modèles que par leurs valeurs moyennes et non leurs distributions. Ceci permet de justifier l'utilisation de variables aléatoires distribuées exponentiellement pour caractériser le trafic, ce qui simplifie grandement la résolution des modèles en raison de leur propriété sans mémoire.

Bonald Thomas et Proutiere AlexandreP [38] commencent par identifier les conditions nécessaires et suffisantes d'insensibilité liées à une vaste classe de réseaux de files PS. Dans [39] Thomas Bonald développe un ensemble de règles, certaines nécessaires, d'autres suffisantes pour la création de modèles à base des files d'attente insensibles. Une des notions importantes parmi les règles proposées est la notion de réversibilité partielle. Un réseau de file d'attente est dit partiellement réversible si les équations des taux de visites ont une solution positive quel que soit l'état du réseau et si chaque file de ce réseau peut être décrite par un processus de Markov réversible. L'auteur aboutit finalement à un résultat très intéressant : vérifier qu'un réseau de files PS est partiellement réversible est nécessaire et suffisant pour affirmer la propriété d'insensibilité.

La discipline PS et sa propriété d’insensibilité ont dès lors été au cœur de plusieurs travaux visant à modéliser un réseau soumis au trafic élastique. Berger et Kogan [40] définissent un modèle de réseau de files d’attente fermé à forme produit respectant la propriété d’insensibilité afin de modéliser la bande passante utilisée par un trafic élastique. Heyman, Lakshman et Neidhardt [41] mais aussi Ben Fredj, Bonald, Proutière, Régnié et Roberts [42], et Massoulié et Roberts [43], s’intéressent aux sessions TCP. Les premiers font usage d’un modèle de réseaux de files d’attente fermé pour analyser les performances du trafic WEB avec le protocole TCP. Cette étude conclut qu’en plus du *Round-Trip Time* (RTT), la connaissance de la taille moyenne des fichiers à télécharger et des temps moyens entre deux téléchargements sont suffisants pour modéliser la bande passante du lien considéré. Les deux autres travaux considèrent quant à eux des modèles ouverts de files d’attente, plus adéquats pour des populations très larges. Les modèles sont conçus sous forme de files M/G/1 avec la discipline de service PS. Les auteurs montrent l’insensibilité du débit moyen du trafic au processus d’arrivée des flots et à la distribution de leur taille.

3.3.2 Mobilité des utilisateurs

La mobilité des utilisateurs joue un rôle important dans l’analyse des performances des réseaux informatiques en général et dans le contexte de communication sans fil en particulier. Par exemple, dans les réseaux cellulaires comme dans la plupart des réseaux sans fil, l’éloignement de la station de base entraîne une dégradation des conditions radios et donc du rapport signal à bruit (SINR). Ceci conduit à l’attribution d’un nouveau MCS moins performant en terme de débit utile, tel que dicté par le mécanisme de Modulation et Codage Adaptatifs (AMC) utilisé dans les réseaux cellulaires.

Bien que revisité dans le contexte actuel des réseaux 4G et Pré-5, divers modèles de mobilité des utilisateurs dans les réseaux de communication ont déjà été proposés afin de définir les caractéristiques pertinentes de la mobilité [44]. Nous présentons ici quelques travaux pertinents sur cet aspect très important des réseaux cellulaires.

Deux catégories principales de modèles de mobilité peuvent être identifiées. Tout d’abord, les modèles géométriques représentent explicitement les chemins aléatoires de déplacement des utilisateurs dans le plan, par exemple, le modèle appelé *Random Waypoint* (RW). Dans ce modèle, un utilisateur mobile passe de sa position actuelle à la position suivante par un jeu de hasard. La vitesse et la direction sont choisies uniformément dans les plages numériques $[v_{min}, v_{max}]$ et $[0, 2\pi]$ respectivement. Dans [45] le modèle RW permet aux auteurs de montrer que le taux de handover est proportionnel à la racine carrée de la densité des utilisateurs dans la cellule. Cependant, ces modèles géométriques ne reflètent généralement pas la dynamique du trafic (les arrivées de demande de transfert de données et les fins de service). Bien d’autres travaux se sont appuyés sur le RW comme modèle de mobilité des utilisateurs dans les réseaux cellulaires. Nous pouvons citer par exemples Zonoozi [46], Rubin [47] et Bar-Noy [48] qui utilisent le RW pour modéliser le déplacement d’un utilisateur dans une cellule et entre les cellules d’un réseau. Comme autres modèles de cette catégorie, nous pouvons citer

le *Random Gauss-Markov* [49] qui est une variante du RW où la vitesse de déplacement est constante, ou encore *Reference Point Group Mobility* (RPGM) [50] qui modélise le déplacement des groupes d'utilisateurs.

D'autre part, les modèles non spatiaux abordent cette dynamique du trafic aux dépens d'une description simplifiée de la mobilité. En effet, la mobilité est simplement modélisée en supposant que les utilisateurs en mouvement sauteront entre des zones de conditions de transmission distinctes. Par exemple, des travaux comme [51, 52, 53] utilisent cette approche, le changement de zone est alors modélisé par un processus de Markov. Le gain dû à la mobilité est ensuite estimé à travers les limites supérieures et inférieures associées aux vitesses de déplacement (vitesse infinie et quasi stationnaire respectivement) des utilisateurs.

En plus des cas limites de mobilité (vitesse infini et régime quasi stationnaire), Karray et Mohamed Kadhemdes [54] dérivent des expressions approximatives pour la prise en compte de l'impact de la mobilité des utilisateurs dans les modèles proposés. Le mouvement des utilisateurs est estimé au moyen de la résolution numérique d'un processus markovien. La répartition des utilisateurs en régime stationnaire est ensuite estimée en utilisant le théorème d'ergodique.

3.3.3 Modélisation des réseaux

Nous abordons finalement dans cette section quelques travaux intéressants s'appuyant sur la modélisation analytique pour évaluer les performances des réseaux cellulaires. Le but ne sera évidemment pas de constituer une liste exhaustive. Nous nous intéresserons tout d'abord aux modèles non spécifiques à une technologie sans fil particulière. Nous évoquerons ensuite quelques modèles spécialement dédiés aux technologies 4G. Enfin, nous finirons par la présentation des rares modèles analytiques conçus en tenant compte de la mobilité des utilisateurs.

Modèles pour les réseaux sans fil

Plusieurs modèles analytiques tentent d'établir les performances de réseaux cellulaires sans se limiter à une technologie sans fil particulière. Nous pouvons citer :

Elayoubi Salah, Khadraoui Younes, Baynat Bruno et En-Najjary Taoufik [55] mènent une étude intéressante sur les modèles analytiques de la littérature dédiés aux réseaux cellulaires. Ces auteurs classent les modèles analytiques dédiés aux réseaux cellulaires en deux catégories : les modèles à source d'utilisateurs infinie, qui sont des modèles découlant du modèle Erlang et les modèles à source d'utilisateurs finie qui découlent du d'Engset. Ils proposent ensuite une méthodologie permettant de paramétrer les outils d'évaluation de performance en termes de conditions radio et de paramètres de trafic à partir des données provenant des réseaux réels. La comparaison des résultats des modèles analytiques aux performances observées sur les réseaux permet aux auteurs de montrer que la capacité moyenne d'une cellule est quasiment égale la moyenne harmonique des capacités des utilisateurs dans une cellule. Cependant, les auteurs ne prennent

pas en compte la variation des conditions radio des utilisateurs. Les résultats présentés ne sont donc valides qu'en situation de faible mobilité.

Borst [29] porte son intérêt sur les réseaux cellulaires utilisant la politique d'allocation d'équité proportionnelle pour partager les ressources entre les utilisateurs. Ces derniers génèrent tous du trafic élastique et sont répartis en différentes classes selon leurs conditions radio. Le profil d'un utilisateur est donc déterminé par sa capacité de transmission. L'auteur modélise ce système grâce à une file M/G/1 avec une discipline de service PS dont le taux de service varie en fonction des classes des utilisateurs en cours de transmission. Ce modèle tient donc compte de la différence de conditions radio entre les utilisateurs présents dans une même cellule. Toutefois, il ne prend pas en compte les variations de ces conditions. Il suppose que chaque utilisateur garde les mêmes conditions radio pendant toute la durée de son service. Si cette hypothèse est acceptable pour modéliser certains réseaux sans fil avec bandes de fréquences restreintes et utilisateurs fixes, ce n'est pas le cas des cellules de types 4G et 5G à venir. En effet, comme nous avons pu le voir dans le chapitre 1, les variations sont en fait bien plus fréquentes dans les cellules 4G à cause des mouvements des utilisateurs.

Boxma et Kurkova [56, 57] considèrent également des files M/G/1. Cependant, les auteurs s'intéressent à l'intégration de deux classes de trafic ayant des priorités différentes. Les serveurs des files considérées ont une vitesse de traitement pouvant prendre deux valeurs distinctes. Ces services à vitesse variable sont définis afin de modéliser la priorité d'une classe de trafic sur l'autre. L'étude des modèles proposés conduit seulement à des estimations asymptotiques de la charge des différentes files. Ainsi, ils ne nous informent pas sur les performances des différentes classes de trafic.

Sharif et Hassibi [58] s'intéressent aux conséquences des variations radio sur le délai d'acheminement des paquets avec une politique d'allocation opportuniste. Cette politique consiste à accorder les ressources uniquement aux utilisateurs ayant les meilleures conditions radio. L'objectif étant de maximiser l'efficacité d'utilisation de la ressource car ces utilisateurs ont les meilleurs MCS. Les auteurs considèrent deux modèles de canal. Le premier est sans mémoire : le MCS d'un utilisateur à un instant donné ne dépend pas de ses MCS précédents. Les résultats de leur analyse montrent que l'utilisation d'un mécanisme de MIMO ne permet pas de réduire le délai moyen d'acheminement des paquets de manière significative et qu'il est alors préférable d'utiliser une politique de *Round Robin*. Le deuxième modèle de canal est avec mémoire : le MCS d'un utilisateur à un instant donné est fonction des précédents. Ils arrivent à la conclusion que le mécanisme de MIMO peut dans ce cas améliorer sensiblement les performances s'il est employé avec une technique de *Beamforming*. Le modèle proposé conduit donc à de nombreux résultats intéressants, mais reste cependant limité à l'étude du canal radio.

Dirani, Tarhini et Chahed [30], Randhawa et Hardy [59] ainsi que Hlavacs, Haring, Kamra et Bansal [60] proposent d'utiliser des chaînes de Markov à plusieurs dimensions pour modéliser le trafic et le partage de la bande passante dans les réseaux cellulaires. Les premiers proposent une chaîne bidimensionnelle, une dimension pour les connexions temps réel et une autre pour les connexions élastiques. Ils utilisent le principe de quasi-stationnarité défini dans [61] pour simplifier la résolution du modèle bidimensionnel.

Toutefois, ce modèle ne prend pas en compte les variations des conditions radio dans les réseaux cellulaires. Cette faiblesse est corrigée par une extension proposée par les mêmes auteurs dans [62]. Les nombres d'états et de transitions de la chaîne augmentent alors exponentiellement. Les deuxièmes et les troisièmes quant à eux mettent l'accent sur les effets de handover et considèrent eux aussi plusieurs classes de trafic. La chaîne de Markov proposée comporte autant de dimensions que de classe de trafic à considérer. L'étude de ces chaînes multidimensionnelles est loin d'être triviale. En effet, si ces modèles basés sur des chaînes de Markov ont le mérite d'être des représentations simples et intuitives des réseaux cellulaires, leur résolution reste complexe et les éloigne donc de notre objectif de simplicité.

Réseaux 4G

Alors que les réseaux 4G étaient encore à leur début, des chercheurs ont mené d'importants travaux afin de comprendre les propriétés fondamentales et les performances de cette nouvelle génération de réseaux cellulaires qui se positionnait en rupture avec les générations précédentes. Ainsi différentes fonctionnalités des réseaux LTE et LTE-A ont été analysées : le mécanisme d'accès [63, 64, 65], l'ordonnancement des paquets [66] ou encore la technologie MIMO [67]. Au niveau utilisateur, [68] et [69] se basent sur la simulation et les données collectées sur des réseaux LTE, respectivement, pour comprendre le comportement des utilisateurs. Ces études bien que très utiles restent de la simulation ou de l'analyse des traces et gardent donc les lacunes de ces méthodes. Comme modèles analytiques consacré aux réseaux 4G, nous pouvons citer les travaux de Grønsund, Engelstad, Johnsen et Skeie [70] mais également de Lin, Vucetic et Mao [71] qui s'intéressent aux variations de la qualité du lien radio dans les cellules employant la technique d'accès multiple OFDMA. Les premiers se concentrent sur des réseaux WiMAX tandis que les seconds se focalisent sur des réseaux LTE. Dans les deux cas, les auteurs proposent des modèles analytiques permettant d'estimer le SINR à partir d'expressions à formes closes. Ces travaux confirment la forte variabilité des canaux radio du système OFDMA que ce soit dans le domaine temporelle que fréquentiel. De plus, les résultats qu'ils apportent permettent d'associer à chaque MCS une probabilité d'être utilisé. Ces résultats s'avèrent donc très utiles pour caractériser le canal radio d'un utilisateur, car une telle estimation permet de connaître le MCS utilisé par la station de base pour chaque transmission. Doirieux Sébastien, Baynat Bruno, Maqbool Masood et Coupechoux Marceau [72] modélisent eux aussi une cellule WiMAX. Ils supposent que la cellule abrite un nombre fini d'utilisateurs générant uniquement du trafic élastique. Les modèles markoviens proposés considèrent plusieurs politiques d'allocation de ressources, les politiques respectant l'équité en terme de temps ou de débit et les politiques opportunistes. Ces modèles offrent des expressions à formes closes des paramètres de performance, ce qui est un réel avantage.

Huang, Qian, Gerber, Alexandre, Z Morley, Subhabrata, et Spatscheck [68] développent un modèle permettant de dériver empiriquement la puissance consommée dans un réseau LTE. À partir des traces collectées sur des smartphones, les auteurs dé-

terminent la consommation d'énergie dans les réseaux 3G, LTE et WiFi et évaluent l'impact de la configuration de certains paramètres du LTE sur la consommation énergétique. Ils arrivent à quelques résultats intéressants : ils montrent qu'en dépit de plusieurs améliorations dans l'économie d'énergie, le LTE reste jusqu'à 23 fois moins efficace en énergie par rapport au WiFi, et même moins efficace en énergie que la 3G. En outre, ils trouvent également que le goulet d'étranglement de performance pour les applications se situe de plus en plus au niveau de la puissance de traitement des appareils dans le LTE comparé au cas de la 3G [73].

Même si certains de ces travaux présentés ici reconnaissent l'hétérogénéité des conditions radio sur une cellule, l'impact de la mobilité des utilisateurs n'est pas considéré. La mobilité étant un enjeu majeur dans les réseaux 4G actuels et 5G à venir, il est nécessaire pour pouvoir capturer les performances d'une cellule d'introduire la mobilité des utilisateurs dans le développement des modèles.

Prise en compte de la mobilité des utilisateurs

Les travaux de Grossglauser Matthias et Tse David [74] représente l'un des premiers travaux montrant l'impact de la mobilité sur les performances des communications sans fil. Ces auteurs proposent un modèle qui prend en compte la mobilité des nœuds dans un réseaux ad-hoc. Les auteurs évaluent ensuite les performances du système et montrent que le débit moyen à long terme par paire de nœuds source-destination peut être maintenu constant même lorsque le nombre de nœuds par unité de surface augmente. Cela implique qu'au moins en termes de taux de croissance en fonction du nombre de nœuds, il n'y a pas de perte significative de débit par paire source-destination quand il y a beaucoup de nœuds dans le réseau. Ceci contraste fortement avec le scénario du réseau avec des nœuds fixes.

Bonald, Borst et Proutière [51] mais également Bonald, Borst, Hegde, Jonckheere et Proutière [52] étudient les bornes de performance dans les réseaux sans fil. Dans [52] les auteurs portent leur l'attention sur un réseau de plusieurs stations de base avec des interférences intercellulaires. Ils commencent par décrire les conditions nécessaires et suffisantes pour la stabilité du réseau. Ensuite ils construisent des bornes inférieures et supérieures de performances des utilisateurs et montrent que la mobilité a tendance à améliorer la condition de stabilité et la capacité du réseau. Cela est vrai aussi bien dans le cas d'un ordonnancement globalement optimal dans le réseau que dans le cas d'un ordonnancement équitable local (par cellule). Dans [51] les auteurs définissent la borne inférieure et la borne supérieure de performances des utilisateurs. Ces bornes correspondent respectivement aux cas des utilisateurs statiques et des utilisateurs se déplaçant avec une vitesse infinie. En utilisant des techniques de comparaison stochastique, ils montrent que ces régimes limites fournissent des limites de performances simples qui ne dépendent que de la charge du réseau. Il est à noter toutefois que, cette hypothèse de vitesse infinie n'est clairement pas réaliste. Pour des vitesses réalistes, les auteurs se tournent vers des simulations. Les résultats de ces simulations permettent de voir la cohérence des bornes de performance obtenues des modèles. Ces deux publications

confirment les résultats de [74] sur l'impact positif de la mobilité des utilisateurs sur les performances.

Bziuk, Zaghloul et Jukan [75] s'intéressent aux déplacements des utilisateurs dans des cellules utilisant le OFDMA. Dans cette optique, les auteurs conçoivent un modèle permettant d'obtenir les statistiques concernant la mobilité des utilisateurs et la fréquence des *handovers*. Il en résulte alors des expressions à formes closes du nombre moyen de *handovers* et de la probabilité d'itinérance ou *roaming* en fonction d'hypothèses génériques concernant les sessions des utilisateurs, leur temps de séjour, la zone de couverture de la cellule. Il est intéressant de souligner que pour obtenir ces expressions les auteurs analysent le régime transitoire d'une chaîne de Markov à laquelle sont régulièrement ajoutés des états absorbants. Un résultat important de ce modèle est qu'il montre que dans de nombreux scénarios la proportion de *handovers* n'est pas simplement le rapport de la durée moyenne d'une session sur le temps moyen de résidence dans la cellule. Notons enfin que ce modèle constitue un travail très intéressant car il permet l'obtention de la fréquence de *handovers* des utilisateurs qui est un paramètre permettant de contrebalancer l'impact bénéfique de la mobilité sur les performances dans la mesure où le *handovers* est couteux en ressource et en temps.

Jdidi Anis et Chahed Tijani dans [76] s'intéressent également aux réseaux cellulaires fonctionnant avec le système OFDMA. Ils modélisent un système OFDMA utilisant l'équité proportionnelle (PF) et la modulation hiérarchique (HM). Le modèle qui est une chaîne de Markov multidimensionnelle considère que la cellule est découpée en différentes zones géographiques et que le MCS d'un utilisateur dépend uniquement de la zone dans laquelle il se trouve. Chaque état de la chaîne de Markov sur laquelle repose le modèle correspond alors à une répartition possible des utilisateurs dans les différentes zones. Les transitions de la chaîne permettent alors de modéliser les déplacements des utilisateurs d'une zone à l'autre. Malgré la complexité de l'analyse de cette chaîne, les auteurs en tirent cependant des résultats intéressants. Ils montrent qu'en présence du HM, une simple politique cyclique d'allocation comme *Round Robin*(RR) donne de meilleures performances que le PF. Mais cependant, le PF conduit à de meilleurs résultats que le RR lorsque le HM n'est pas employé. Les auteurs expliquent ce phénomène par la diminution des opportunités de superposer les transmissions des mobiles avec de mauvais MCS puisqu'ils accèdent moins à la ressource lorsqu'une politique d'équité proportionnelle est employée.

Pour finir, notons que si les modèles analytiques présentés dans cette sous-section prennent tous en compte la mobilité des utilisateurs, ils reposent soit sur la résolution d'une chaîne de Markov complexe soit sur des hypothèses de mobilité peu réalistes. L'approche que nous adoptons dans cette thèse vise à produire des modèles adaptés pour l'évaluation des performances au niveau *flow* des cellules de type 4G et pré-5G en tenant compte du caractère mobile des utilisateurs. Nous mettons un accent particulier sur la simplicité de résolution des modèles proposés afin de garantir la facilité d'utilisation et le passage à l'échelle.

3.4 Synthèse

Ce chapitre a permis de faire un tour d'horizon des nombreuses contributions relatives à l'évaluation de performances des réseaux cellulaires. Nous avons dans un premier temps présenté les travaux basés sur la simulation puis, dans un second temps, ceux s'appuyant sur la modélisation analytique. Nous avons pu voir que quelle que soit l'approche envisagée, de nombreux obstacles inhérents à la nature du canal de communication interviennent lorsqu'il s'agit d'étudier les performances des réseaux cellulaires. Cependant les travaux présentés dans ce chapitre nous ont apporté des enseignements précieux. Nous avons notamment compris que les modèles d'Erlang et d'Engset pouvaient servir d'outils de base pour la conception des modèles pour le trafic temps réel. Un enseignement très important pour cette thèse a été l'insensibilité des files PS aux distributions des variables aléatoires gouvernant le trafic. Nous avons aussi pu constater l'importance du mécanisme AMC mis en œuvre dans les réseaux cellulaires, notamment à travers le changement fréquent de MCS des utilisateurs mais aussi la nécessité de trouver un moyen de prendre en compte ce changement tout en gardant une complexité acceptable des modèles. C'est fort de ces enseignements que nous avons développé les modèles présentés dans les chapitres suivants. De plus nous verrons que les modèles développés ont été pensés pour prendre en compte de façon simple et réaliste la mobilité des utilisateurs dans les réseaux cellulaires et répondre de façon quasi instantanément aux problèmes d'évaluation de performances dans ces réseaux.

Chapitre 4

Cellule isolée à capacité constante

4.1 Introduction

Parmi les nombreux types de cellules utilisées dans les réseaux cellulaires 4G actuels, beaucoup sont des petites cellules, c'est-à-dire des cellules dont la zone géographique à couvrir est de quelques mètres ou dizaines de mètres. Il peut s'agir de *Mirocell*, des *Picocell* ou encore des *Femtocell*. Ces petites cellules sont placées au plus près des utilisateurs à l'intérieur comme à l'extérieur des bâtiments dans des zones résidentielles densément peuplées. Elles ont le triple mérite de permettre d'absorber le trafic supplémentaire, de parfaire la couverture et d'améliorer la qualité de service. Ces cellules sont susceptibles d'être visitées par des résidents qui restent immobiles pendant le service et des passants qui sont en mouvement pendant le service. Afin de comprendre et quantifier les effets de la mobilité sur les performances d'une petite cellule, nous proposons ici des modèles développés spécifiquement pour des petites cellules en prenant en compte la mobilité de certains utilisateurs.

Ce quatrième chapitre est donc consacré à nos modèles adaptés aux petites cellules avec une capacité constante sur la zone de couverture et accueillant des utilisateurs statiques et mobiles. Il débute par une description du système considéré. Nous présentons ensuite les modèles markovien et PS se focalisant sur les performances des utilisateurs statiques dans une telle cellule. Le modèle markovien étant un modèle exact, une comparaison des deux modèles est présentée afin de montrer la précision du modèle PS. Des résultats de validation par simulations sont également fournis. Ce chapitre se conclut par un bref résumé des notions importantes abordées.

4.2 Système

Considérons une zone géographique couverte par des petites cellules, par exemple des secteurs d'un campus universitaire, le bâtiment d'une moyenne entreprise, le domicile d'une famille. Chaque petite cellule étant de portée limitée, il est raisonnable de considérer que la capacité de transmission C (Mbit/s) d'une cellule est spatiale-

ment constante sur la zone à couvrir. Le cas des macrocellules à capacité variable sera considéré dans le chapitre 5. La petite cellule est visitée par les utilisateurs statiques et mobiles ; ces derniers se déplacent dans la petite cellule et peuvent traverser une ou plusieurs petites cellules avant d'achever un transfert de données. La capacité de transmission C de chaque petite cellule est équitablement partagée entre tous les utilisateurs présents dans sa zone de couverture au moyen d'une discipline de service équitable en ressources comme *Round-Robin*. En d'autres termes, à tout moment t , le débit instantané de transfert de données de chaque utilisateur actif présent dans la cellule est de $C/N(t)$ Mbits/s si le nombre total d'utilisateurs actifs dans la cellule est $N(t)$. Nous abordons ici l'impact de ces utilisateurs mobiles sur les performances des utilisateurs statiques dans la petite cellule. Dans la suite de ce chapitre, nous utilisons de façon interchangeable les termes « petite cellule » et « cellule ».

Les utilisateurs statiques et mobiles présents dans la zone géographique couverte par la cellule considérée génèrent des demandes de transmission de données selon des processus de Poisson indépendants de taux λ_s et λ_m , respectivement. λ_m prend en compte aussi bien les utilisateurs mobiles qui débutent leur transmission de données dans la cellule que ceux qui arrivent dans la cellule en ayant déjà débuté leur transmission dans une autre cellule. Nous notons par Σ le volume de données que veut transférer un utilisateur quel que soit son type. Dès qu'une nouvelle demande arrive (générée par un utilisateur statique ou mobile), elle déclenche le début d'une nouvelle transmission de données. Pour un utilisateur statique, cette transmission dure jusqu'à la réception complète des données demandées. Le volume transféré est alors équivalent à Σ . Pour un utilisateur mobile, la transmission peut prendre fin soit parce que l'utilisateur a reçu la totalité des données demandées avant de quitter la cellule, soit parce qu'il a quitté la cellule avant la fin du transfert. Par conséquent, le volume transféré vers un utilisateur mobile est toujours inférieur ou égal à Σ . Nous notons par Θ le temps de séjour physique d'un utilisateur mobile actif dans la cellule, c'est-à-dire la durée pendant laquelle l'utilisateur mobile est physiquement présent dans la cellule une fois que la transmission a commencé. Il est à noter que Θ peut être exprimé comme étant le rapport de la distance aléatoire D parcourue par l'utilisateur mobile dans la cellule (à partir de son point d'activation) par la vitesse de déplacement V que nous supposons constante de l'utilisateur : $\Theta = D/V$. Enfin, nous désignons par

$$\mu = \frac{C}{\mathbb{E}(\Sigma)} \quad (4.1)$$

le taux de service de la cellule, c'est-à-dire le nombre de transmissions complètes de données que la cellule est capable d'assurer par unité de temps. Une transmission complète se réfère ici soit à la transmission d'un utilisateur statique, soit à celle d'un utilisateur mobile qui n'a pas quitté la cellule avant de terminer son transfert.

4.3 Modèles

4.3.1 Modèle markovien

L'état d'occupation de la cellule peut être décrit par le processus bidimensionnel $(N_s(t), N_m(t))_{t \geq 0}$, où $N_s(t)$ (resp. $N_m(t)$) est le nombre de transferts de données des utilisateurs statiques (resp. des utilisateurs mobiles) en cours dans la cellule à un instant t . L'évolution de ce processus s'apparente à une file d'attente PS avec impatience [77], les clients "impatients" correspondant ici aux utilisateurs mobiles qui peuvent quitter le système avant d'avoir achevé leur transmission de données.

Pour caractériser simplement l'évolution de cette file d'attente PS avec impatience, nous supposons que le volume Σ est exponentiellement distribué avec pour paramètre $1/\mathbb{E}(\Sigma)$ et que la durée Θ suit également une distribution exponentielle de paramètre $\theta = 1/\mathbb{E}(\Theta)$, où θ est le taux d'impatience. Le processus $(N_s(t), N_m(t))_{t \geq 0}$ est alors clairement markovien avec le diagramme de transition illustré à la figure 4.1. De n'importe quel état (n_s, n_m) , $n_s > 0$, $n_m > 0$, on peut atteindre l'état $(n_s + 1, n_m)$ avec le taux de transition λ_s correspondant à l'arrivée d'une nouvelle demande de transfert d'un utilisateur statique, ou l'état $(n_s - 1, n_m)$ avec le taux de transition $n_s \mu / (n_s + n_m)$, correspondant à la fin du transfert de données de l'un des n_s utilisateurs statiques parmi les $n_s + n_m$ utilisateurs présents dans le système. De l'état (n_s, n_m) on peut atteindre l'état $(n_s, n_m + 1)$ avec un taux de transition λ_m correspondant à l'arrivée d'une nouvelle demande de transfert d'un utilisateur mobile, ou l'état $(n_s, n_m - 1)$ avec un taux de transition $n_m \mu / (n_s + n_m) + n_m \theta$; le second terme ($n_m \theta$) correspond à l'un des n_m utilisateurs mobiles quittant la cellule avant la fin de son transfert.

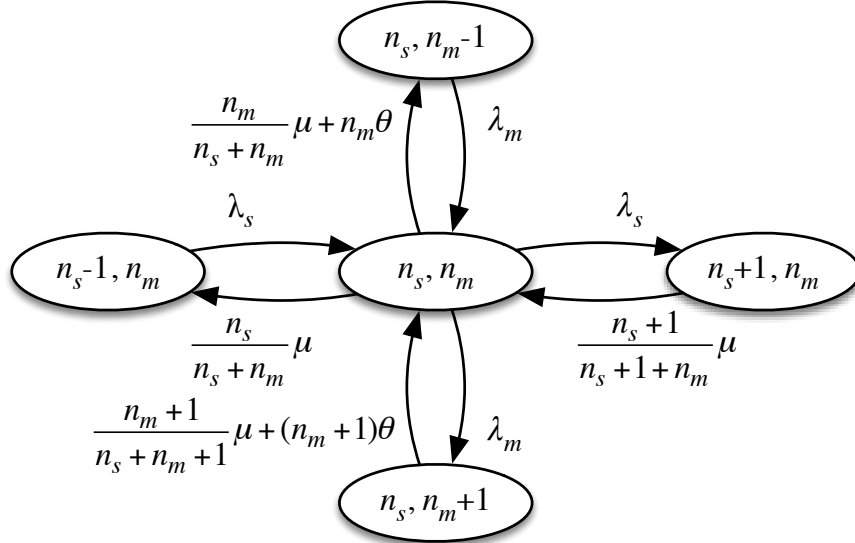


FIGURE 4.1 – Diagramme de transition du processus markovien $(N_s(t), N_m(t))_{t \geq 0}$

Le processus $(N_s(t), N_m(t))_{t \geq 0}$ atteint son régime stationnaire si $\rho_s = \lambda_s / \mu < 1$. No-

tez que cette condition de stabilité ne dépend pas de l'intensité du trafic des utilisateurs mobiles. Intuitivement, cela peut être compris par le fait que ces derniers quittent toujours la cellule après un temps fini et ne peuvent donc pas provoquer une surcharge du système. La condition $\rho_s < 1$ satisfaite, il est facilement vérifiable à partir du diagramme de transition de la figure 4.1 que le processus $(N_s(t), N_m(t))_{t \geq 0}$ est non réversible, et donc, sa distribution stationnaire $p(n_s, n_m)$, $n_s, n_m \geq 0$, n'admet pas de forme produit. Nous pouvons néanmoins déterminer la distribution stationnaire du processus en résolvant numériquement le système d'équations d'équilibre global associé, en tronquant les deux dimensions de l'espace d'état et en utilisant une technique numérique appropriée (par exemple *Gauss-Seidel* ou *Least mean square*).

À partir de cette distribution, il est alors possible de déduire les indicateurs de performance qui nous intéressent. Tout d'abord, nous calculons le débit moyen $\bar{\gamma}$ obtenu par un utilisateur statique dans la cellule :

$$\bar{\gamma} = \frac{\lambda_s \mathbb{E}(\Sigma)}{\mathbb{E}(N_s)}, \quad (4.2)$$

où $\mathbb{E}(N_s)$ est le nombre moyen d'utilisateurs statiques dans la cellule et $\mathbb{E}(N_s)/\lambda_s$ est le temps moyen nécessaire pour transférer le volume moyen $\mathbb{E}(\Sigma)$. Ce temps est obtenu par la loi de Little. Nous calculons ensuite la proportion H des utilisateurs mobiles qui quittent la cellule avant d'avoir achevé leur transmission (taux de *handover* de la cellule). H est calculée comme étant égale à la somme sur tous les états $(N_s(t), N_m(t))$ ayant au moins un utilisateur mobile, de la probabilité de quitter l'état par l'effet de la mobilité $(\frac{(n_s+n_m)\theta}{\mu + (n_s + n_m)\theta})$, multipliée par la probabilité d'être dans cet état et normalisée sur les états ayant au moins un utilisateur mobile $(p(n_s, n_m)/\mathbb{P}(N_m \geq 1))$.

$$H = \sum_{n_s \geq 0, n_m \geq 1} q(n_s, n_m) \frac{(n_s + n_m)\theta}{\mu + (n_s + n_m)\theta}, \quad (4.3)$$

où $q(n_s, n_m) = p(n_s, n_m)/\mathbb{P}(N_m \geq 1)$.

4.3.2 Modèle file PS

Bien que le modèle markovien puisse être résolu numériquement, il ne se prête pas à des expressions explicites pour le débit moyen $\bar{\gamma}$ obtenu par les utilisateurs dans la cellule ou la probabilité de *handover* H d'un utilisateur mobile. En outre, il est limité à la distribution exponentielle des variables Σ et Θ . Nous proposons maintenant un modèle approximatif basé sur les file d'attente de type *Processor-Sharing* qui permet de dériver les expressions des paramètres de performance dans un cadre d'hypothèses plus large.

Au lieu de voir les utilisateurs mobiles comme des clients impatients pour la file d'attente *Processor-Sharing*, nous pouvons les considérer comme appartenant à une autre classe similaire à celle des utilisateurs statiques mais avec un taux de service distinct $\mu_m \neq \mu$ qui tient compte des départs anticipés des utilisateurs mobiles du

système en raison de leur mobilité. Plus précisément, nous représentons l'occupation de la cellule par une file PS multiclasse avec 2 classes de clients, une classe pour les utilisateurs statiques et une classe pour les utilisateurs mobiles, comme illustré à la Figure 4.2.

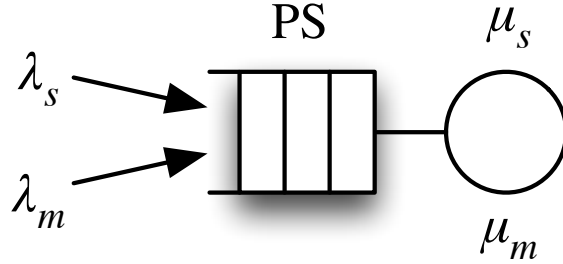


FIGURE 4.2 – File PS multiclasse.

Comme expliqué à la section 4.2, les utilisateurs statiques (ou mobiles) génèrent des requêtes de transfert de données suivant des processus de Poisson avec un taux λ_s (resp. λ_m), et le taux de service des utilisateurs statiques est :

$$\mu_s = \mu = C/\mathbb{E}(\Sigma). \quad (4.4)$$

La question importante devient l'estimation du taux de service équivalent des utilisateurs mobiles $\mu_m \neq \mu$. Dans un premier temps, supposons que la quantité moyenne de données \bar{x} transférée par un utilisateur mobile avant qu'il ne quitte physiquement la cellule soit connu. Nous avons $\bar{x} \leq \mathbb{E}(\Sigma)$, car l'utilisateur est susceptible de quitter la cellule avant d'avoir téléchargé le volume Σ ; cette quantité est évidemment liée à la charge totale de la cellule lors de la visite de l'utilisateur et au temps de séjour physique Θ des utilisateurs mobiles dans la cellule. Connaissant \bar{x} , nous pouvons écrire le taux de service des utilisateurs mobiles dans la file d'attente PS comme suit :

$$\mu_m = \frac{C}{\bar{x}}. \quad (4.5)$$

Si nous supposons connus les paramètres λ_s , λ_m , μ_s et μ_m , les résultats standard des files d'attente *Processor-Sharing* multiclassées (voir chapitre 2) peuvent être facilement appliqués pour calculer le débit moyen $\bar{\gamma}$ obtenu par les utilisateurs statiques et mobiles pendant leur transfert, c'est-à-dire :

$$\bar{\gamma} = C(1 - \rho), \quad (4.6)$$

où $\rho = \rho_s + \rho_m$ et

$$\rho_s = \frac{\lambda_s}{\mu} = \frac{\lambda_s \mathbb{E}(\Sigma)}{C}, \quad \rho_m = \frac{\lambda_m}{\mu_m} = \frac{\lambda_m \bar{x}}{C}. \quad (4.7)$$

Rappelons que la condition de stabilité pour cette file d'attente PS multi-classe est $\rho < 1$, et il est donc nécessaire que $\rho_s < 1$ pour assurer la stabilité du système. La suffisance de la condition $\rho_s < 1$ est moins directe. Cependant, comme indiqué ci-dessus, les utilisateurs mobiles quittant la cellule après une durée de temps finie, il ne peuvent pas causer la surcharge du système. Nous pouvons donc conjecturer que $\rho_s < 1$ est suffisante pour garantir la stabilité du système.

Il reste à déterminer le paramètre manquant \bar{x} , requis dans l'expression de μ_m . Considérons un utilisateur mobile avec un volume donné $\Sigma = y$ à transférer. S'il reste dans la cellule pendant un temps $t \geq y/\bar{\gamma}$, il pourra compléter son transfert. En revanche, s'il reste dans la cellule pendant un temps $t < y/\bar{\gamma}$, ce temps ne lui permet de télécharger que $\bar{\gamma}t$ bits en moyenne. Le volume moyen $\bar{x}(y)$ transféré par un utilisateur mobile dans la cellule peut donc être exprimé comme suit :

$$\bar{x}(y) = \int_0^{\frac{y}{\bar{\gamma}}} \bar{\gamma}t f_{\Theta}(t) dt + \int_{\frac{y}{\bar{\gamma}}}^{+\infty} y f_{\Theta}(t) dt \quad (4.8)$$

où f_{Θ} est la densité de probabilité du temps Θ qu'un utilisateur mobile passe dans la cellule après de le début de la transmission. En déconditionnant l'expression 4.8 par rapport à la distribution de Σ , \bar{x} s'écrit,

$$\bar{x} = \int_0^{+\infty} \bar{x}(y) f_{\Sigma}(y) dy, \quad (4.9)$$

avec $\bar{x}(y)$ exprimé dans (4.8) et f_{Σ} la densité de probabilité de la quantité Σ de donnée à transférer. Nous obtenons donc un système de quatre équations dépendantes (4.5, 4.6, 4.7, 4.9) :

$$\begin{cases} \mu_m = \frac{C}{\bar{x}} & (4.5) \\ \bar{\gamma} = C(1 - \rho) & (4.6) \\ \rho = \rho_s + \rho_m, \text{ et } \rho_s = \frac{\lambda_s}{\mu} = \frac{\lambda_s \mathbb{E}(\Sigma)}{C}, \quad \rho_m = \frac{\lambda_m}{\mu_m} = \frac{\lambda_m \bar{x}}{C} & (4.7) \\ \bar{x} = \int_0^{+\infty} \bar{x}(y) f_{\Sigma}(y) dy \text{ et } \bar{x}(y) = \int_0^{\frac{y}{\bar{\gamma}}} \bar{\gamma}t f_{\Theta}(t) dt + \int_{\frac{y}{\bar{\gamma}}}^{+\infty} y f_{\Theta}(t) dt & (4.9) \end{cases}$$

que nous résolvons par une méthode itérative de point fixe. La résolution du système d'équations 4.3.2 permet de déterminer le taux de service μ_m des utilisateurs mobiles, il ne reste plus qu'à appliquer l'équation 4.6 pour obtenir le débit $\bar{\gamma}$ obtenu par un utilisateur dans la cellule. La probabilité de *handover* H peut alors être estimée comme étant la probabilité que le temps Θ passé dans la cellule soit inférieur au temps $\frac{y}{\bar{\gamma}}$ nécessaire pour achever le transfert, le tout déconditionné par rapport à Σ :

$$H = \int_0^{+\infty} \mathbb{P} \left[\Theta \leq \frac{y}{\bar{\gamma}} \right] f_{\Sigma}(y) , dy. \quad (4.10)$$

Si nous supposons, comme précédemment, que Σ et Θ sont exponentiellement distribués, l'intégrale (4.9) donne :

$$\bar{x} = \frac{\mathbb{E}(\Sigma)\bar{\gamma}}{\mathbb{E}(\Sigma)\theta + \bar{\gamma}}. \quad (4.11)$$

Cette relation nous permet de réduire facilement le dernier ensemble d'équations (4.5,4.6, 4.7,4.9) ou 4.3.2 à une simple équation quadratique en $\bar{\gamma}$ avec une unique solution positive, donnant ainsi le débit moyen d'un utilisateur dans la cellule ;

$$\bar{\gamma} = \frac{C - \mathbb{E}(\Sigma)(\lambda_s + \lambda_m + \theta) + \sqrt{\Delta}}{2}, \quad (4.12)$$

où $\Delta = (C - \mathbb{E}(\Sigma)(\lambda_s + \lambda_m + \theta))^2 + 4\theta\mathbb{E}(\Sigma)(C - \lambda_s\mathbb{E}(\Sigma))$.

Enfin, en appliquant l'hypothèse de distributions exponentielles de Σ et Θ à l'équation (4.10), la probabilité de *handover* devient :

$$H = \frac{\mathbb{E}(\Sigma)\theta}{\mathbb{E}(\Sigma)\theta + \bar{\gamma}}. \quad (4.13)$$

Malgré sa simplicité, il est à remarquer que, contrairement au modèle markovien, ce deuxième modèle basé une file PS peut s'appliquer avec une gamme plus large d'hypothèses pour les distributions du temps de séjour Θ d'un utilisateur mobile dans la cellule et du volume Σ de données qu'un utilisateur veut transférer, tout en restant très facile à mettre en œuvre.

4.4 Description du simulateur

La simulation stochastique est une des méthodes de l'évaluation d'une mesure de la sûreté de fonctionnement d'un système ou de son modèle, notamment quand les systèmes sont trop grands ou trop complexes pour être résolus de manière exact analytiquement. Nous avons au cours de cette thèse fais usage de la simulation stochastique pour valider les modèles proposés. nous présentons dans cette section une description du simulateur utilisé.

Les concepts fondamentaux de la simulation s'appuient méthodologiquement sur deux notions de base : **système** et **modèle**. La première désigne un ensemble de composants reliés d'une certaine manière alors que la seconde signifie une abstraction du système réel. Le choix du modèle est guidé par les caractéristiques du système et les propriétés à évaluer. Les modèles de simulations peuvent être classifiés de différentes manières par exemple : Modèles statiques vs modèles dynamiques, Modèles déterministes vs modèles stochastiques, Modèles continus vs modèles discrets

Le simulateur que nous avons développé est un simulateurs stochastique à événements discrets reposant sur Matlab. Les principaux caractéristiques de ce simulateurs sont les suivants :

- Trafic : le simulateur s'appuie sur le même modèle de trafic que celui de nos modèles analytiques, à savoir un temps d'inter-arrivées des utilisateurs exponentiellement distribué. Les utilisateurs sont donc instanciés dans le simulateur en suivant une distribution de poisson. À l'arrivée d'un utilisateur, on lui associe une taille de données à télécharger qui est tirée d'une variable aléatoire exponentiellement distribuée.

- Discipline de service : la discipline de service est la discipline PS : C'est-à-dire qu'à chaque instant, un utilisateur dans le système obtient un débit égale à la capacité de la station de base divisée par le nombre total d'utilisateurs présents dans le système.
- Mobilité : la mobilité d'un utilisateurs est reproduite en tirant une variable aléatoire qui indique le temps au bout du quel l'utilisateur n'est plus considéré comme actif même s'il n'a pas terminé son téléchargement.
- Échéancier : l'échéancier est une liste d'événements ordonnés chronologiquement selon leur date d'occurrence. Ensuite l'événement le plus imminent, c'est-à-dire dont le temps de son occurrence (ou la durée de son temporisation) est le plus petit en est enlevé pour l'exécution. L'horloge de simulation est avancée de la durée de temporisation de l'événement. Pendant l'exécution d'un événement, l'état du système est mis à jour (De nouveaux événements sont insérés dans la liste). Initialement l'échéancier contient qu'un événement, l'arrivée du premier utilisateur.
- Horloge de simulation : il s'agit d'une variable qui enregistre le temps de simulation actuel. Ce dernier est avancé lorsqu'un événement a lieu. Initialement l'horloge est mise à zéro. La simulation prend fin lorsque qu'il y a eu un nombre assez important d'événements exécutés.

4.5 Validation

Nous proposons maintenant de valider le modèle file PS en comparant les résultats de ce dernier à ceux du modèle markovien. Rappelons que le modèle markovien est un modèle exact tant que les hypothèses de la section 4.3.1 sont satisfaites, à savoir des distributions exponentielles du volume de données à transférer et du temps de séjour d'un utilisateur mobile dans la cellule.

Parmi les nombreuses comparaisons que nous avons pu effectuer, nous proposons ici d'étudier une configuration représentative des résultats obtenus dont les paramètres sont récapitulés dans le tableau 4.1.

Paramètres	Valeur
Capacité de la cellule, C	$C = 40Mbits/s$
Volume moyen à transférer, $\bar{\Sigma}$	10 Mo
Vitesse moyenne d'utilisateur mobile, V	50 km/h
Distance moyenne parcourue par un utilisateur mobile, $\mathbb{E}(D)$	100 m
Taux moyen d'impatience des utilisateurs mobiles, $\theta = \frac{V}{\mathbb{E}(D)}$	$0,14s^{-1}$

TABLE 4.1 – Paramètres

La figure 4.3 compare le débit moyen des utilisateurs statiques $\bar{\gamma}$ fourni par les deux modèles, en fonction de la charge ρ_s induite par les utilisateurs statiques. Les lignes continues (respectivement pointillées) correspondent aux résultats du modèle

markovien (resp. modèle file PS). Chacun des trois ensembles de courbes correspond à une proportion d'utilisateurs mobiles $p \in \{0, 2; 0, 5; 0, 8\}$.

Nous pouvons voir que les résultats fournis par le modèle file PS restent proches des résultats du modèle markovien (avec une erreur relative inférieure à 8 % dans la plupart des cas). De plus le modèle file PS semble fournir une borne inférieure (c'est-à-dire conservatrice) du débit d'un utilisateur statique dans la cellule. Comme on aurait pu le prévoir, on remarque la décroissance du débit des utilisateurs statiques avec l'augmentation de la charge de ces mêmes utilisateurs. De plus, le débit se dégrade considérablement à mesure que la proportion d'utilisateurs mobiles augmente, augmentant ainsi la charge totale $\rho = \rho_s + \rho_m$ de la cellule.

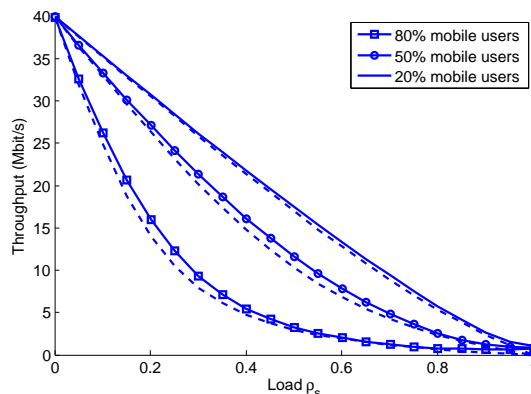


FIGURE 4.3 – Débit des utilisateurs statiques en fonction de la charge ρ_s pour différentes proportions d'utilisateurs mobiles (vitesse $V = 50$ km/h, distance moyenne parcourue dans la cellule $\mathbb{E}(D) = 100$ m).

La figure 4.4 représente la probabilité de *handover* H des utilisateurs mobiles, toujours en fonction de la charge ρ_s des utilisateurs statiques. Nous utilisons les mêmes valeurs numériques pour tous les paramètres, mais à des fins de clarté, nous représentons simplement deux ensembles de courbes correspondant à une proportion d'utilisateurs mobiles $p \in \{0, 2; 0, 5\}$. On peut remarquer que lorsque la charge des utilisateurs statiques est très faible, c'est-à-dire $\rho_s \rightarrow 0$, le débit tend vers la capacité de la cellule ($\bar{\gamma} \rightarrow C$) et au vu de (4.13), nous avons $H \rightarrow \sigma\theta/(\sigma\theta + C)$. Avec les valeurs des paramètres considérées, cela donne $H \rightarrow 0,22$ lorsque $\rho_s \rightarrow 0$. De cette valeur initiale, la probabilité de *handover* augmente avec la charge des utilisateurs statiques et H tend vers 1 lorsque ρ_s approche de 1. On remarque également que le modèle file PS est très précis à des charges relativement faibles et devient légèrement moins précis à mesure que la charge augmente, mais garde dans tous les cas une précision acceptable.

Nous présentons ensuite la robustesse des modèles à la distribution du temps de séjour Θ des utilisateurs mobiles dans la cellule. La distribution exponentielle précédemment considérée pour Θ n'est probablement pas une hypothèse réaliste. En effet, si l'on considère qu'un utilisateur mobile se déplace dans la cellule le long d'un diamètre à

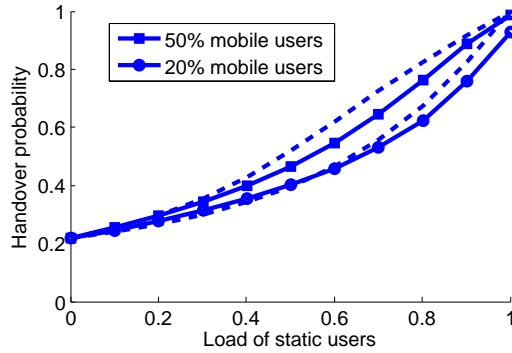


FIGURE 4.4 – *Probabilité de handover en fonction de la charge ρ_s .*

vitesse constante à partir d’une position initiale uniformément répartie sur ce diamètre, on peut facilement montrer que dans ce cas Θ suit une distribution uniforme et non exponentielle.

Afin d’étudier l’impact de cette hypothèse très peu réaliste, la figure 4.5 présente le débit des utilisateurs statiques en fonction de leur charge pour différentes distributions du temps de séjour d’un utilisateur mobile. Les résultats pour les distributions uniforme et déterministe sont obtenus par simulations, tandis que ceux pour la distribution exponentielle sont obtenus en résolvant numériquement le modèle markovien. Nous notons que le débit n’est que légèrement affecté par la distribution du temps de séjour des utilisateurs mobiles.

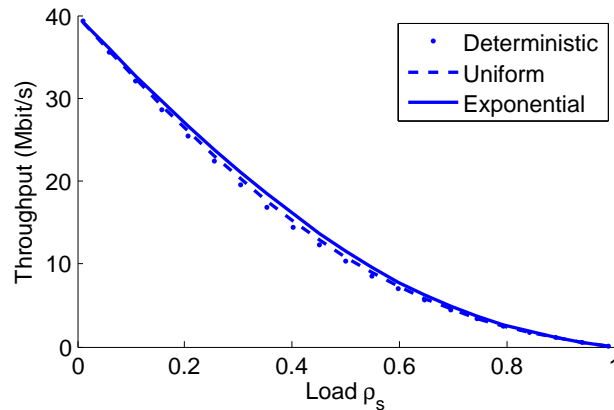


FIGURE 4.5 – *Débit des utilisateurs statiques en fonction de leur charge ρ_s pour différentes distributions du temps de séjour d’un utilisateur mobile dans le système.*

4.6 Impact des paramètres clés

À l'aide du modèle file PS, nous discutons dans cette section l'impact de certains paramètres clés du système tels que la vitesse des utilisateurs mobiles ou la taille de la cellule sur les performances des utilisateurs. La figure 4.6 présente les variations du débit $\bar{\gamma}$ par rapport à la vitesse de déplacement V des utilisateurs mobiles dans la cellule, en considérant différentes valeurs de la charge des utilisateurs statiques $\rho_s \in \{0, 2; 0, 5; 0, 8\}$ (De haut en bas) et une proportion fixe d'utilisateurs mobiles $p = 0, 5$.

Comme le montre la figure, le débit $\bar{\gamma}$ d'un utilisateur statique augmente avec la vitesse V des utilisateurs mobiles, validant le fait que les utilisateurs statiques bénéficient d'une mobilité accrue des utilisateurs mobiles. En effet, plus leur vitesse V augmente, plus les utilisateurs mobiles quittent la cellule par *handover*, offrant ainsi l'opportunité aux utilisateurs statiques restés dans la cellule d'obtenir plus de ressources.

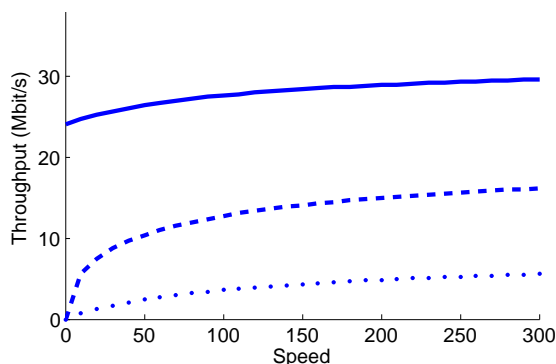


FIGURE 4.6 – Débit des utilisateurs statiques en fonction de la vitesse V des utilisateurs mobiles dans la cellule et de la charge $\rho_s \in \{0, 2; 0, 5; 0, 8\}$ (de haut en bas) des utilisateurs statiques.

Pour finir, la figure 4.7 montre l'impact de la taille de la cellule considérée. Nous avons considéré une microcellule, une picocellule et une femtocellule de diamètre 1 km, 100 m et 10 m respectivement. Nous considérons également une vitesse $V = 5$ km/h pour les utilisateurs mobiles. Sans grande surprise, on constate que les utilisateurs des Femtocellules ont le meilleur rendement car ils bénéficient du fait que les utilisateurs mobiles quittent plus rapidement la cellule, offrant ainsi l'opportunité aux utilisateurs statiques restés dans la cellule d'obtenir plus de ressources.

4.7 Synthèse

Tout au long de ce chapitre, nous avons présenté nos modèles analytiques dédiés aux petites cellules à capacité constante sur la zone de couverture. Ces modèles ont été spécifiquement développés en tenant compte du caractère mobile de certains utilisateurs dans les réseaux cellulaires actuels. De plus, l'accent a été mis sur la simplicité des

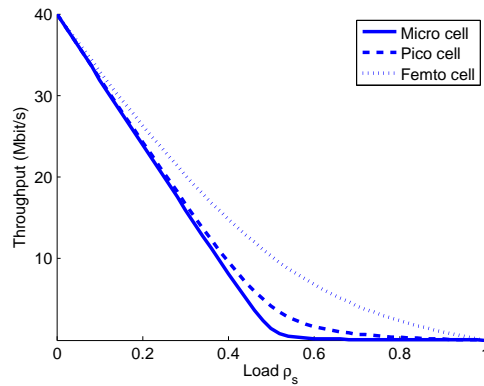


FIGURE 4.7 – Débit des utilisateurs statiques en fonction de leur charge ρ_s et de la taille de la cellule.

expressions des paramètres de performances permettant d'obtenir des résultats quasi instantanément.

Modèle markovien

Dans un premier temps, nous avons proposé un modèle basé sur une chaîne de Markov multidimensionnelle. Ce modèle repose sur des hypothèses fortes sur les distributions du temps de séjour des utilisateurs mobiles dans la cellule et de la quantité de données à transférer par un utilisateur. En effet, le modèle markovien ne peut être résolu que dans le cas où ces paramètres suivent des distributions exponentielles. Toutefois ce modèle reste d'un intérêt considérable car il fournit des résultats exacts, ce qui peut être utile pour valider d'autres modèles.

Modèle file PS

Dans un deuxième temps, nous avons proposé le modèle file PS, qui est une simple file d'attente. Ce modèle, bien qu'étant une approximation, permet d'obtenir des résultats de performances avec une très bonne précision. Il reste applicable pour une large gamme d'hypothèses sur la distribution du temps de séjour des utilisateurs dans la cellule. L'intérêt majeur de ce modèle réside dans sa simplicité et la possibilité de l'étendre pour d'autres types de cellules, comme nous le verrons dans le chapitre suivant.

Chapitre 5

Macrocellule isolée avec différentes zones de codage

5.1 Introduction

En plus des petites cellules, les réseaux cellulaires abritent des cellules de plus grandes tailles pouvant couvrir des zones géographiques de plusieurs dizaines de kilomètres. À l'inverse de ce qui se passe dans les petites cellules, la capacité de transmission d'un utilisateur est variable sur la zone de couverture de la cellule. Il est donc capital de disposer de modèles capables de saisir cette nuance et d'en évaluer les effets sur les performances. Nous présentons dans ce chapitre le modèle développé pour des macrocellules transportant du trafic élastique et en tenant compte de la mobilité des utilisateurs dans ces cellules. Il s'ouvre par la présentation d'une macrocellule. Nous développons ensuite un modèle de files d'attente PS multiclassées qui capture la mobilité des utilisateurs entre les zones d'une cellule, à travers notre modèle de mobilité présenté au chapitre 1. Ce modèle de mobilité est découplé du modèle de la cellule lui-même, permettant ainsi d'appliquer au modèle proposé divers modèles de mobilité des utilisateurs. Nous montrons ensuite que le modèle proposé est cohérent avec les limites analytiques connues correspondant à un système avec des utilisateurs statiques ou des utilisateurs ayant une vitesse infinie.

5.2 Système

5.2.1 Une macrocellule LTE offrant J zones de codage

Considérons une macrocellule LTE avec une discipline de service *Round Robin*. Pour un nombre donné d'utilisateurs actifs dans la cellule, les ressources sont équitablement réparties entre les utilisateurs. Un utilisateur seul dans la cellule obtient en général un débit qui varie en fonction de son éloignement de l'eNodeB qui le sert. La cellule peut donc être divisée en J zones de conditions radio différentes, chacune étant caractérisée

par un débit nominal, c'est-à-dire le débit maximal que peut obtenir un utilisateur présent dans cette zone lorsque'il est choisi par l'eNodeB pour effectuer sa transmission de données [78]. Un utilisateur de la zone j , $j = 1, \dots, J$, c'est-à-dire actuellement présent dans la zone j , obtiendra un débit C_j , s'il est seul dans toute la cellule. Même si cela n'est pas une nécessité absolue pour le développements des modèles présentés, nous pouvons supposer que les J zones forment des cercles concentriques de rayon R_j comme illustré sur la figure 5.1, La zone 1 étant la zone au centre de la cellule et la zone J celle à la périphérie. Cette hypothèse est utilisée pour illustrer la façon dont les paramètres d'entrée du modèle peuvent être reliés à la vitesse de déplacement des utilisateurs dans ce cas particulier. Tout autre modèle structurel de cellules, par exemple des cellules hexagonales avec sectorisation, peut être utilisé sans affecter les développements des modèles.

5.2.2 Trafic et mobilité

Nous considérons que les demandes de connexion ou de transfert de données arrivent dans la cellule selon un processus de Poisson de taux Λ . Nous supposons qu'un utilisateur qui initie une nouvelle demande de connexion a une probabilité p_j d'être initialement dans la zone j et donc de commencer son téléchargement dans cette zone. Ainsi, les nouvelles demandes de connexion arrivent dans la zone j selon un processus de Poisson de taux $\Lambda_j = p_j\Lambda$.

Contrairement à la plupart des précédents travaux sur les modèles à base de file d'attente PS (par exemple, [78]), nous supposons que les utilisateurs sont mobiles et peuvent donc changer de zone pendant leur téléchargement, ou quitter la cellule avant de terminer leur transfert. Le modèle de mobilité que nous considérons est le suivant. Il est important de souligner qu'il s'agit d'un modèle de mobilité physique des utilisateurs découplé de l'utilisation des ressources de la cellule par les utilisateurs. Nous désignons par Θ_j le temps de séjour physique d'un utilisateur dans la zone j à chaque visite de la zone, c'est-à-dire la durée pendant laquelle il reste physiquement dans la zone j . C'est le temps qui s'écoule entre le moment où l'utilisateur apparaît dans la zone j (soit parce qu'il commence son téléchargement, soit parce qu'il quitte une zone ou cellule voisine pour la zone j) et le moment où l'utilisateur quitte la zone j (étant toujours actif ou non) pour une zone voisine ou quitte définitivement la cellule. Nous définissons ensuite P_{ji} , la probabilité qu'un utilisateur qui quitte physiquement la zone j (c'est-à-dire qui sort de cette zone en étant actif ou non), aille dans la zone voisine i . Si l'extérieur de la cellule est étiqueté 0, P_{j0} est la probabilité qu'un utilisateur quitte la cellule par la zone j et P_{0j} , la probabilité qu'un utilisateur entre dans la cellule par la zone j . Notez que lorsque les zones forment des cercles concentriques, les utilisateurs ne peuvent quitter et entrer dans la cellule que par la zone J .

Nous supposons que chaque nouvelle demande de connexion (quelle que soit sa zone initiale) apporte un volume de données Σ identiquement distribué à télécharger. Dès qu'une nouvelle demande de connexion arrive, elle déclenche le début d'une nouvelle transmission de données (dans la zone où la demande apparaît). Cette transmission se

termine soit parce que l'utilisateur a terminé son transfert avant de quitter la cellule (quel que soit le nombre de zones qu'il a visité pendant ce temps), soit parce qu'il a quitté la cellule avant de terminer son transfert. En conséquence, le volume effectivement transféré par un utilisateur donné dans la cellule est, en moyenne, inférieur à Σ .

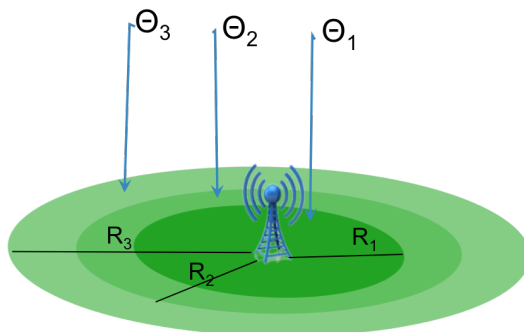


FIGURE 5.1 – Macrocellule divisée en 3 zones de codage.

Nous considérons que les variables aléatoires Σ et Θ_j sont exponentiellement distribuées. La première hypothèse est nécessaire pour les dérivations présentées ci-dessous. En fait, en raison de la propriété sans mémoire de la distribution exponentielle, supposer une distribution exponentielle du volume de données à transférer nous permet d'oublier la quantité de données déjà transférée par un utilisateur dans les zones ou cellules précédentes, tant qu'il est toujours actif. Ceci permet de simplifier considérablement l'analyse. D'autre part, le choix d'une distribution exponentielle du temps de séjour par passage dans chaque zone n'est fait qu'à des fins de simplification, d'autres distributions plus réalistes peuvent être envisagées.

5.2.3 Estimation des paramètres lorsque les zones forment des cercles concentriques

Nous considérons maintenant le cas particulier où les J zones forment des cercles concentriques de rayon R_j , (comme sur la figure 5.1), et nous montrons comment estimer les paramètres de trafic et de mobilité.

Tout d'abord, la surface de la zone j est $S_j = \pi(R_j^2 - R_{j-1}^2)$, pour $j > 1$ et $S_1 = \pi R_1^2$. Si les arrivées de nouvelles demandes de connexion sont uniformément réparties sur toute la surface de la cellule, la probabilité p_j qu'une nouvelle demande de connexion apparaisse dans la zone j , est proportionnelle à la surface de la zone j :

$$p_j = \frac{S_j}{\pi R_J^2}. \quad (5.1)$$

En ce qui concerne le temps de séjour moyen dans la zone j , $\mathbb{E}(\Theta_j)$, nous pouvons raisonnablement supposer qu'il est proportionnel à la racine carrée de la surface de la

zone et inversement proportionnel à la vitesse V des utilisateurs :

$$\mathbb{E}(\Theta_j) = K \frac{\sqrt{S_j}}{V}, \quad (5.2)$$

où K est une constante qui peut être reliée à la vitesse des utilisateurs.

Lorsque les zones forment des cercles concentriques, un utilisateur qui quitte physiquement la zone j , $j = 2, \dots, J - 1$, a une probabilité $P_{j \ j-1}$ de se déplacer vers la zone $j - 1$ et une probabilité $P_{j \ j+1}$ de passer dans la zone $j + 1$ (avec, bien sûr, $P_{j \ j-1} + P_{j \ j+1} = 1$). Pour la zone 1, $P_{12} = 1$ évidemment. De la zone J , un utilisateur peut soit revenir à la zone $J - 1$ avec une probabilité $P_{J \ J-1}$, soit quitter la cellule avec une probabilité P_{J0} . Toutes ces probabilités dépendent clairement du rayon R_j des zones et de la mobilité réelle des utilisateurs. Cependant, sans hypothèses supplémentaires sur la mobilité physique des utilisateurs, nous utilisons l'approximation suivante :

$$P_{j \ j-1} = \frac{R_{j-1}}{2R_j}, \quad j > 1. \quad (5.3)$$

Il s'agit d'une approximation linéaire qui respecte les limites évidentes suivantes : lorsque $R_{j-1} \rightarrow 0$, $P_{j \ j-1} \rightarrow 0$, et lorsque $R_{j-1} \rightarrow R_j$, $P_{j \ j-1} \rightarrow \frac{1}{2}$.

Notez que les probabilités p_j et P_{ij} , ainsi que les temps de séjour moyens $\mathbb{E}(\Theta_j)$, sont des paramètres d'entrée pour notre modèle. Toutes expressions alternatives résultant d'un modèle de mobilité réel des utilisateurs, peuvent être utilisées sans modifier le développement présenté ci-dessous.

5.3 Modèle

5.3.1 Macrocellule ouverte

Pour simplifier la présentation, nous considérons d'abord dans cette section que la cellule est isolée, nous ne prenons donc pas en compte les utilisateurs actifs qui font un *handover* des cellules voisines vers la cellule considérée. Cette hypothèse sera revue à la section 5.3.2.

Le modèle représente l'occupation de la cellule par une file d'attente *Processor Sharing* multi-classe, comme illustré à la figure 5.2. Chaque classe correspond à une zone de la cellule. Les clients de la classe j arrivent dans la file d'attente suivant un processus de Poisson de taux λ_j , $j = 1, \dots, J$. Il est important de noter que, contrairement au modèle PS du chapitre 4, λ_j est différent du taux Λ_j des nouvelles demandes de connexion qui apparaissent dans la zone j , car il doit inclure l'arrivée des utilisateurs actifs venant des zones voisines. Si on désigne par Λ_{ij} le nombre moyen d'utilisateurs actifs qui passent de la zone i à la zone j par unité de temps, nous avons :

$$\begin{cases} \lambda_1 = \Lambda_1 + \Lambda_{21} \\ \lambda_j = \Lambda_j + \Lambda_{j-1j} + \Lambda_{j+1j}, \quad j = 2, \dots, J - 1 \\ \lambda_J = \Lambda_J + \Lambda_{J-1J} \end{cases} \quad (5.4)$$

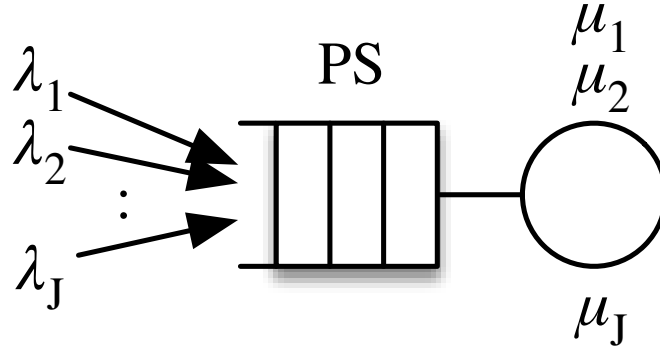


FIGURE 5.2 – File PS multiclassées à J classes

Il est à noter que pour renoncer à l’hypothèse selon laquelle la cellule est isolée de l’extérieur, il suffira d’ajouter à λ_j un terme qui représentera le taux d’utilisateurs actifs faisant un *handover* de l’extérieur vers la cellule considérée. Pour le moment, nous pouvons simplement considérer que ce taux est inclus dans le taux supposé connu Λ_j de nouvelles demandes de connexion apparaissant dans la zone J .

Le taux de service de la classe j peut à son tour être exprimée comme à l’équation 4.5 du chapitre 4 :

$$\mu_j = \frac{C_j}{\bar{x}_j}, \quad (5.5)$$

où \bar{x}_j est défini comme le nombre moyen de bits transférés par un utilisateur actif dans la zone j à chaque visite de la zone, c’est-à-dire, entre le moment où il entre dans la zone (ou apparaît dans la zone) et le moment où il la quitte (ou finit son transfert dans la zone).

Avant d’aller plus loin, il est important de souligner que cette file d’attente PS est toujours stable, c’est-à-dire que le système décrit est toujours stable. Cela s’explique intuitivement par le fait que tous les utilisateurs sont mobiles et finiront donc par quitter la cellule après un temps fini. En effet, lorsque le taux d’arrivée de nouvelles demandes de connexions augmente et tend à l’infini, les utilisateurs finissent par quitter la cellule même s’il n’ont pas pu télécharger le moindre bit et donc, ils ne pourront pas causer la surcharge du système.

Il nous reste à estimer tous les paramètres d’entrée de la file d’attente PS ; c’est-à-dire λ_j et μ_j , pour $j = 1, \dots, J$, ou plus précisément tous les Λ_{ij} et \bar{x}_j . Il est à noter qu’au chapitre 4, seul le paramètre \bar{x} était à estimer.

Si on suppose connus les paramètres λ_j et μ_j , les résultats standards des files PS multi-classes peuvent être facilement appliqués pour calculer le débit moyen $\bar{\gamma}_j$ obtenu par les utilisateurs dans la zone j pendant leur transfert, c’est-à-dire,

$$\bar{\gamma}_j = C_j(1 - \rho), \quad (5.6)$$

avec $\rho = \sum_{j=1}^J \rho_j$ et $\rho_j = \frac{\lambda_j}{\mu_j}$.

Afin d'estimer les premiers paramètres manquants \bar{x}_j , requis dans l'expression de μ_j , nous utilisons la méthodologie développée au chapitre 4 pour le calcul de \bar{x} , lorsque la cellule avait une seule zone et nous l'appliquons à chaque zone individuellement. Comme indiqué au chapitre 4, équation 4.11, dans le cas particulier où Σ et Θ_j sont exponentiellement distribués, \bar{x}_j est relié au débit moyen $\bar{\gamma}_j$ obtenu par les utilisateurs dans la zone j et au temps moyen $\mathbb{E}(\Theta_j)$ qu'un utilisateur passe physiquement dans la zone j , comme suit :

$$\bar{x}_j = \frac{\mathbb{E}(\Sigma)\mathbb{E}(\Theta_j)\bar{\gamma}_j}{\mathbb{E}(\Sigma) + \mathbb{E}(\Theta_j)\bar{\gamma}_j}. \quad (5.7)$$

Il nous reste maintenant à estimer les paramètres manquants Λ_{ij} apparaissant dans les expressions de λ_j . Si nous désignons par h_j la probabilité de *handover* de la zone j , c'est-à-dire la probabilité qu'un utilisateur actif dans la zone j la quitte sans avoir terminé son transfert, nous pouvons exprimer $\Lambda_{j,j+1}$ et $\Lambda_{j,j-1}$ comme :

$$\begin{cases} \Lambda_{j,j+1} = \lambda_j h_j P_{j,j+1}, & j = 1, \dots, J-1 \\ \Lambda_{j,j-1} = \lambda_j h_j P_{j,j-1}, & j = 2, \dots, J \end{cases} \quad (5.8)$$

$\Lambda_{j,j+1}$ (resp. $\Lambda_{j,j-1}$) est égale au nombre (λ_j) d'utilisateurs qui arrivent des la zone j par unité de temps, multiplié par la probabilité h_j de quitter cette zone sans avoir complété son téléchargement, le tout multiplié par la probabilité $P_{j,j+1}$ (resp. $P_{j,j-1}$) d'aller dans la zone $j+1$ (resp. $j-1$) lorsqu'on quitte la zone j . Les probabilités de *handover* h_j peuvent à leur tour être exprimées comme suit :

$$h_j = \int_0^{+\infty} \mathbb{P} \left[\Theta_j \leq \frac{y}{\bar{\gamma}_j} \right] f_{\Sigma}(y) dy, \quad (5.9)$$

h_j est calculée comme étant la probabilité que le temps Θ_j passé dans la zone j par l'utilisateur soit inférieur au temps $\frac{y}{\bar{\gamma}_j}$ nécessaire pour compléter son transfert, le tout déconditionné par rapport à Σ . En supposant des distributions exponentielles pour Σ et Θ_j , l'intégrale précédente se réduit à :

$$h_j = \frac{\mathbb{E}(\Sigma)}{\mathbb{E}(\Sigma) + \mathbb{E}(\Theta_j)\bar{\gamma}_j}. \quad (5.10)$$

Les entrées du modèle (λ_j et μ_j) dépendent donc de sa sortie γ_j . Nous obtenons donc un système de 6 équations dépendantes (5.4-5.8, 5.10) que nous résolvons à l'aide d'une méthode itérative de point fixe. L'algorithme de ce point fixe est présenté à l'annexe A.

5.3.2 Extension pour prendre en compte les utilisateurs venant des cellules voisines

Considérer que la cellule est isolée, ce qui est l'hypothèse faite jusqu'à présent, n'est pas réaliste. En effet, si des utilisateurs peuvent quitter la cellule sans avoir terminé

leur transfert (ce que nous avons considéré jusqu'ici dans le développement du modèle), il est normal de considérer que certains utilisateurs peuvent arriver dans la cellule venant de l'extérieur, avec un volume de données restant à transférer. Pour tenir compte de ces utilisateurs qui opèrent un *handover* de l'extérieur vers la cellule considérée, nous pouvons simplement ajouter au taux λ_J de la zone externe de la cellule, le taux Λ_{0J} des utilisateurs faisant un *handover* de l'extérieur vers la cellule au cours de leur téléchargement :

$$\lambda_J = \Lambda_J + \Lambda_{J-1J} + \Lambda_{0J} \quad (5.11)$$

La question importante est alors : comment estimer le taux Λ_{0J} des utilisateurs faisant un *handover* de l'extérieur vers la cellule au cours de leur téléchargement ? La solution mentionnée précédemment, qui consiste à considérer que Λ_{0J} est un paramètre d'entrée connu n'est pas satisfaisante. Nous proposons une solution alternative qui consiste à supposer que la cellule considérée se trouve au sein d'un réseau de cellules statistiquement équivalentes. Avec cette hypothèse, le nombre moyen par unité de temps d'utilisateurs actifs qui font un *handover* de la cellule vers l'extérieur doit être égal au nombre moyen d'utilisateurs actifs qui par unité de temps font un *handover* de l'extérieur vers la cellule. En d'autres termes, nous avons $\Lambda_{0J} = \Lambda_{J0}$, et cette dernière quantité peut simplement être reliée à la probabilité de *handover* de la zone la plus externe (la zone J) de la cellule considérée comme suit : $\Lambda_{J0} = \lambda_J h_J P_{J0}$. En conséquence, pour prendre en compte une cellule au sein d'un réseau de cellules statistiquement équivalentes, la dernière équation du système 5.4 doit être remplacée par :

$$\lambda_J = \frac{1}{1 - h_J P_{J0}} (\Lambda_J + \Lambda_{J-1J}). \quad (5.12)$$

Il est important de noter que ce système prenant en compte les utilisateurs venant de l'extérieur n'est plus toujours stable. En effet, les utilisateurs quittent toujours la cellule après un temps fini. Mais lorsqu'un utilisateur quitte la cellule, il est remplacé par un autre qui arrive dans la cellule venant d'une des cellules voisines. Tout ce passe donc comme si les utilisateurs ne quittaient plus la cellule avant la fin de leur transfert de données.

Comme indiqué dans [79], l'état de stabilité de ce système est indépendant de la vitesse V des utilisateurs et équivaut donc à l'état de stabilité du même système avec des utilisateurs se déplaçant à une vitesse infinie. Elle peut s'exprimer comme suit : $\Lambda < \frac{C_\infty}{\mathbb{E}(\Sigma)}$, où C_∞ est la capacité équivalente du système où les utilisateurs ont une vitesse infinie et est définie dans la section 5.3.3.

5.3.3 Stabilité du système

Les performances du système que nous considérons, dans lequel les utilisateurs mobiles se déplacent avec une certaine vitesse V , est délimitée par celles de deux systèmes [51]. Dans le premier, les utilisateurs sont statiques ($V = 0$), et dans le second, les utilisateurs ont une vitesse infinie ($V = \infty$).

Le modèle correspondant au premier système où les utilisateurs sont statiques, est une file d'attente PS multi-classe classique avec les paramètres $\lambda_j = \Lambda_j$ et $\mu_j = \frac{C_j}{\mathbb{E}(\Sigma)}$. Cette file est connue pour être équivalente à une file PS simple de taux d'arrivée $\lambda = \sum_{j=1}^J \lambda_j$, et de taux de service μ égal à la moyenne harmonique des taux de service des classes : $\frac{1}{\mu_S} = \sum_{j=1}^J \frac{p_j}{\mu_j}$, p_j étant la probabilité qu'une nouvelle demande de connexion apparaisse dans la zone j . Cette file correspond à une cellule avec une seule zone ayant une capacité équivalente C_S égale à la moyenne harmonique de C_j :

$$\frac{1}{C_S} = \sum_{j=1}^J \frac{p_j}{C_j}. \quad (5.13)$$

Dans ce système, les utilisateurs statiques obtiennent un débit moyen $\bar{\gamma}_S$ lors de leur transfert, donné par :

$$\bar{\gamma}_S = C_S(1 - \rho_s), \quad (5.14)$$

où $\rho_s = \frac{\lambda}{\mu_S}$, tant que la condition de stabilité $\lambda < \mu_S$ est satisfaite. La figure 5.3 illustre cette première borne en rouge.

Le deuxième système où les utilisateurs ont une vitesse infinie est équivalent à une file PS simple avec un taux d'arrivée $\lambda = \sum_{j=1}^J \lambda_j$ et un taux de service μ_∞ égal à la moyenne arithmétique de chaque taux de service : $\mu_\infty = \sum_{j=1}^J \alpha_j \mu_j$, où $\mu_j = \frac{C_j}{\mathbb{E}(\Sigma)}$ et α_j est la probabilité qu'un utilisateur soit physiquement présent dans la zone j (actif ou non) et est donnée par :

$$\alpha_j = \prod_{i=1}^{j-1} \frac{\mathbb{E}(\Theta_{i+1})P_{i+1i}}{\mathbb{E}(\Theta_i)P_{i+1i}} \alpha_1, \quad j = 2, \dots, J, \quad \text{avec} \quad \sum_{i=1}^J \alpha_i = 1. \quad (5.15)$$

α est la distribution de probabilité stationnaire d'une chaîne de Markov linéaire dont les états sont les zones de la cellule et la transition de l'état j à l'état i est $\Theta_j P_{ji}$.

La figure 5.3 illustre cette deuxième borne en bleu, correspondant à une file d'attente PS avec une capacité équivalente $C_\infty = \sum_{j=1}^J \alpha_j C_j$. Dans ce système, le débit moyen des utilisateurs $\bar{\gamma}_\infty$ est donné par :

$$\bar{\gamma}_\infty = C_\infty(1 - \rho_\infty), \quad (5.16)$$

avec $\rho_\infty = \frac{\lambda}{\mu_\infty}$.

Les performances du système lorsque les utilisateurs ont une vitesse V est donc bornée par les deux systèmes décrits dans cette sous-section. Par exemple, le débit obtenu par les utilisateurs lors de leur séjour dans la cellule, se situe entre ces deux bornes. Comme illustré sur la figure 5.3, le débit commence à partir d'une valeur initiale C_V lorsque la charge est très faible et converge vers la limite $\frac{C_\infty}{\mathbb{E}(\Sigma)}$ (le même pour n'importe quelle vitesse V) lorsque la charge est très élevée.

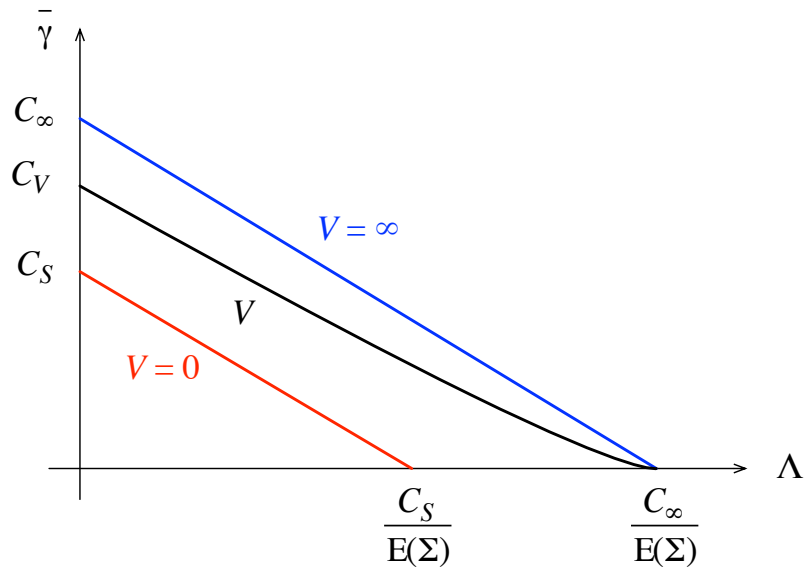


FIGURE 5.3 – Borne de débit obtenu par les utilisateurs dans la cellule.

Pour déterminer C_V , nous considérons la Chaîne de Markov à Temps Continu (CMTC) représentée à la figure 5.4 (pour $J = 4$ zones) et nous modélisons le comportement du système soumis à une charge très faible, c'est-à-dire lorsqu'il y a au plus un client dans la cellule. Les états j de cette CTMC correspondent à un client dans la zone j et l'état 0 à un système vide. Le taux de transition de l'état j à l'état i avec $i, j \neq 0$ est égale au temps moyen $\mathbb{E}(\Theta_j)$ passé dans la zone j multiplié par la probabilité P_{ji} d'aller dans la zone i lorsqu'on quitte la zone j . Le taux de service dans la zone j étant μ_j , de l'état correspondant (l'état j), l'utilisateur peut aller à l'état 0 en terminer son service avec un taux μ_j . La quantité δ peut être vue comme la probabilité que le système passe de zéro à un utilisateur. Dès lors cet utilisateur apparait dans la zone j avec un taux δp_j .

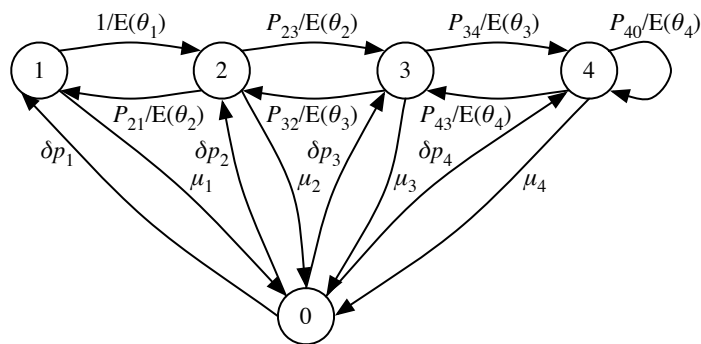


FIGURE 5.4 – CMTC modélisant la cellule à très faible charge.

C_V peut être exprimé à partir des probabilités stationnaires π_i de cette CTMC comme à l'équation 5.17, et correspond à la moyenne arithmétique des capacités C_j

pondérée par les probabilités β_j que l'utilisateur actif (censé être seul dans la cellule) se trouve dans la zone j :

$$C_V = \sum_{j=1}^J \beta_j C_j \text{ avec } \beta_j = \frac{\pi_j}{\sum_{i=1}^J \pi_i}, \quad j = 1, \dots, J. \quad (5.17)$$

Il est à noter que ce résultat ne dépend pas du taux δ apparaissant dans cette CTMC. Enfin, on peut facilement vérifier que pour n'importe quelle vitesse V d'utilisateurs, $C_S < C_V < C_\infty$, $C_V \rightarrow C_S$ quand $V \rightarrow 0$ et $C_V \rightarrow C_\infty$ quand $V \rightarrow \infty$. Les simulations de la section 5.4 montrent que le modèle respecte bien toutes ces limites.

5.3.4 Performances des utilisateurs dans la cellule

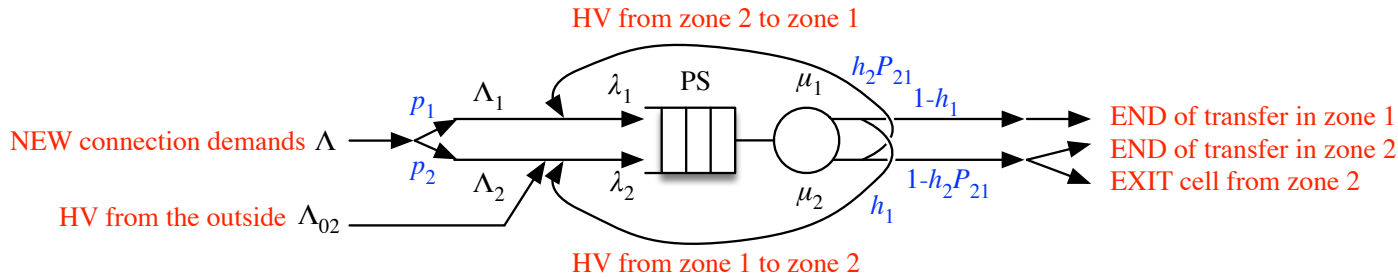


FIGURE 5.5 – Illustration du *handover* entre les zones de la cellule et entre la dernière zone et l'extérieur de la cellule.

Nous montrons maintenant comment déduire du modèle les performances d'un utilisateur actif dans la cellule considérée. Tout d'abord, nous pouvons redessiner le modèle de file d'attente PS figure 5.5, pour le cas particulier où $J = 2$, en montrant clairement les utilisateurs actifs passant d'une zone à l'autre et les utilisateurs actifs venant de l'extérieur.

Soit λ le taux d'arrivée total des demandes de connexion dans la cellule. λ est différent du taux Λ des nouvelles demandes de connexion qui apparaissent dans la cellule, car il doit inclure les utilisateurs qui arrivent de l'extérieur de la cellule tout en étant actifs :

$$\lambda = \Lambda + \Lambda_{0J} = \Lambda + \Lambda_{J0}. \quad (5.18)$$

À partir des résultats classiques des files d'attente PS, nous pouvons calculer le nombre moyen de clients de chaque classe, correspondant au nombre moyen d'utilisateurs actifs dans chaque zone :

$$\bar{Q}_j = \frac{\rho_j}{1 - \rho}. \quad (5.19)$$

D'après la loi de Little, le temps moyen \bar{R} de séjour d'un utilisateur actif dans la cellule, c'est-à-dire le temps écoulé entre le moment où un nouvel utilisateur actif apparaît dans la cellule et le moment où l'utilisateur quitte la cellule en ayant terminé son transfert ou pas est donné par :

$$\bar{R} = \frac{\sum_{j=1}^J \bar{Q}_j}{\lambda}, \quad (5.20)$$

Si on note par q_j la probabilité qu'un utilisateur actif se trouve dans la zone j :

$$q_j = \frac{\bar{Q}_j}{\sum_{i=1}^J \bar{Q}_i}, \quad (5.21)$$

le débit moyen $\bar{\gamma}$ obtenu par un utilisateur actif pendant son séjour dans la cellule s'exprime par :

$$\bar{\gamma} = \sum_{j=1}^J q_j \bar{\gamma}_j. \quad (5.22)$$

De $\bar{\gamma}$ et \bar{R} , nous pouvons déterminer la quantité \bar{X} de données transférée en moyenne par un utilisateur pendant son séjour dans la cellule :

$$\bar{X} = \bar{\gamma} \bar{R}. \quad (5.23)$$

Bien sûr avec $\bar{X} \leq \mathbb{E}(\Sigma)$.

Nous pouvons enfin exprimer la probabilité de *handover* globale H de la cellule, c'est-à-dire la probabilité qu'un utilisateur actif quitte la cellule avant de terminer ses transferts, quel que soit le nombre de zones qu'il a visité. H est calculée comme le rapport entre le nombre moyen d'utilisateurs actifs quittant la cellule par unité de temps (à partir de la zone J) et le nombre total d'utilisateurs actifs qui arrivent dans la cellule par unité de temps :

$$H = \frac{\bar{Q}_J \frac{P_{J0}}{\mathbb{E}(\Theta_J)}}{\lambda}. \quad (5.24)$$

5.3.5 Performances de bout en bout

Nous considérons toujours le cas d'un réseau de cellules statistiquement équivalentes et nous déduisons les performances de bout en bout dans le réseau.

La taille Σ de données à transférer par les utilisateurs étant exponentiellement distribuée, lorsqu'un utilisateur effectue un *handover* (quitte une cellule sans avoir terminé son transfert), la quantité de données restant à transférer a la même distribution que la quantité initiale de données que l'utilisateur veut transférer (propriété sans mémoire de la loi exponentielle). Par conséquent, le nombre n_h de *handovers* qu'un utilisateur effectue et le nombre n_c de cellules qu'un utilisateur visite, avant la fin de son transfert, suivent une distribution géométrique de paramètre H (à partir de 0 pour le premier et de 1 pour le second), donc les moyennes sont données par :

$$\bar{n}_h = \frac{H}{1-H} \text{ et } \bar{n}_c = \frac{1}{1-H}. \quad (5.25)$$

Si on note par t_h la durée d'une procédure de *handover*, c'est-à-dire la durée de l'interruption du service lorsqu'un utilisateur change de cellule, nous pouvons estimer avec la relation 5.26, la durée moyenne \bar{T} du transfert de données de bout en bout d'un utilisateur. Ce temps est défini comme le temps moyen pour qu'un utilisateur puisse effectuer un téléchargement complet quel que soit le nombre de cellules et le nombre de zones que l'utilisateur a visitées lors de son service :

$$\bar{T} = \bar{n}_c \bar{R} + \bar{n}_h t_h. \quad (5.26)$$

Enfin, nous obtenons le débit moyen $\bar{\Gamma}$ qu'un utilisateur obtient lors de son transfert complet de données dans le réseau comme étant le rapport de la taille de données transférée $\mathbb{E}(\Sigma)$ sur le temps total de service dans le réseau :

$$\bar{\Gamma} = \frac{\mathbb{E}(\Sigma)}{\bar{T}}. \quad (5.27)$$

5.4 Évaluation numérique

Nous proposons maintenant de valider notre modèle en le confrontant à des résultats apportés par simulations. Dans ce but, nous avons étendu le simulateur à événements discrets développé pour les petites cellules du chapitre 4 pour prendre en compte des macrocellules à capacité variable dans un réseau homogène. Nous avons reproduit dans le simulateur les hypothèses de trafic et le modèle de mobilité décrit à la sections 5.2.2. Notamment, pour chaque utilisateur, le temps Θ_j de séjour dans la zone j est obtenu par un tirage à partir d'une variable aléatoire exponentiellement distribuée.

La cellule considérée utilise un nombre de 100 *Resource Blocks* pour la liaison en sens descendant et offre aux utilisateurs quatre MCS (28, 23, 16, 6). Il en résulte quatre zones de transmission avec des capacités correspondantes $C_1 = 75$ Mbit/s, $C_2 = 51$ Mbit/s, $C_3 = 31$ Mbit/s et $C_4 = 10$ Mbit/s [80]. Nous définissons la constante $K = \frac{1}{\sqrt{\pi}}$ et nous prenons $\mathbb{E}(\Sigma) = 10$ Mo comme volume moyen de données à transférer par chaque utilisateur. Nous avons utilisé le rayon suivant correspondant au modèle de cercle concentrique de la cellule : $R_1 = 100$ m, $R_2 = 150$ m, $R_3 = 200$ m et $R_4 = 250$ m. R_4 correspond approximativement au rayon de couverture d'une antenne LTE en milieu urbain. Le temps de séjour moyen dans chaque zone $\mathbb{E}(\Theta_j)$ est donné par l'équation 5.2. Selon les estimations données dans la Section 5.2.3, les probabilités résultantes sont rapportées dans le tableau 5.1.

5.4.1 Validation

Dans cette sous-section nous validons le modèle proposé. Nous considérons une cellule avec $J = 4$ zones dont les paramètres sont donnés ci-dessus.

TABLE 5.1 – Probabilités d’arrivée des utilisateurs dans les zones

paramètres	zone 1	zone 2	zone 3	zone 4
probabilité de nouvelles connexions p_j	0,16	0,20	0,28	0,36
probabilité de passage entre zone P_{ij}	$P_{12} = 1$	$P_{21} = 0,33$ $P_{23} = 0,67$	$P_{32} = 0,37$ $P_{34} = 0,63$	$P_{43} = 0,40$ $P_{40} = 0,60$

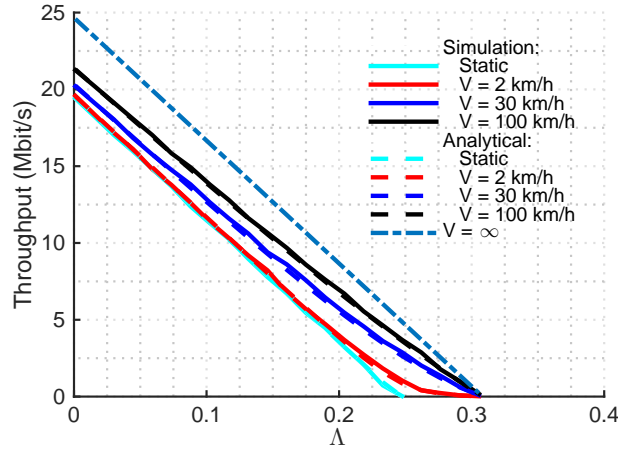


FIGURE 5.6 – Débits des utilisateurs dans la cellule en fonction du taux d’arrivée total des nouvelles demandes de connexion.

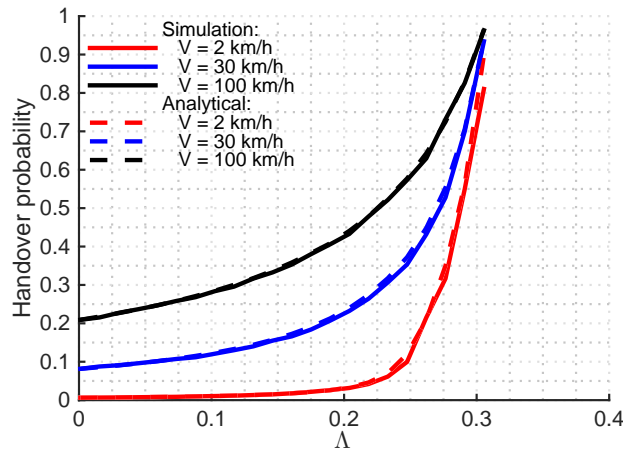


FIGURE 5.7 – Probabilité de *handover* dans la cellule en fonction du taux d’arrivée total des nouvelles demandes de connexion.

Les figures 5.6, 5.7 et 5.8 comparent respectivement le débit obtenu par un utilisateur, la probabilité de *handover* et le temps moyen de séjour d’un utilisateur dans la

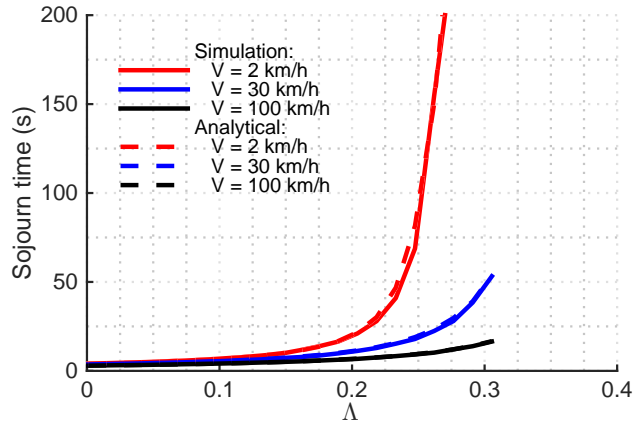


FIGURE 5.8 – Temps moyen de séjour dans la cellule en fonction du taux d’arrivée total des nouvelles demandes de connexion.

cellule considérée en fonction du taux d’arrivée des nouvelles demandes de connexion Λ dans la cellule. Nous avons fait ces comparaisons pour différentes valeurs de vitesse V .

Nous observons que les résultats du modèle sont très proches des résultats de simulation. Les erreurs relatives moyennes entre les performances prédites par le modèle et celles obtenues par simulation sont proches de 8% et ces erreurs restent inférieures à 10% dans le pire des cas.

Comme expliqué dans la section 5.3.3, le débit des utilisateurs mobiles (figure 5.6) est borné par le débit obtenu lorsque tous les utilisateurs sont statiques (borne inférieure) et le débit obtenu lorsque les utilisateurs ont tous une vitesse infinie (borne supérieure). On remarque sur ces courbes que la mobilité améliore aussi bien le temps de séjour des utilisateurs (voir figure 5.8), la capacité C_V de transmission, que le débit obtenu par un utilisateur. Par ailleurs, la stabilité du système se trouve aussi améliorée. En effet, la condition de stabilité est de $\Lambda < 0,24$ pour le système avec uniquement des utilisateurs statiques, et de $\Lambda < 0,30$ lorsque les utilisateurs sont mobiles. Dans ce dernier cas, on constate que la condition de stabilité ne dépend pas de la vitesse des utilisateurs. La raison de cette amélioration est que le gain dû aux utilisateurs qui passent d’une zone à une autre ayant un meilleur MCS est supérieur à la perte dû aux utilisateurs qui se déplacent en sens inverse. Plus précisément, nous observons que même si un utilisateur qui sort physiquement d’une zone est plus susceptible de se déplacer vers la zone voisine la plus externe qui dispose d’un moins bon MCS que celle qu’il quitte, les utilisateurs qui sont dans les zones avec de bons MCS ont plus de chance de terminer leurs transferts avant de quitter cette zone. De ce fait, le nombre moyen d’utilisateurs actifs qui se déplacent des zones avec de bons MCS vers des zones avec des MCS médiocres par unité de temps est inférieur au nombre moyen d’utilisateurs actifs se déplaçant dans la direction opposée. Il est important de constater que, bien sûr, cette amélioration s’accompagne d’une augmentation de la probabilité de *handover* H (voir figure 5.7).

5.4.2 Performances de bout en bout

Nous présentons maintenant les performances des utilisateurs de bout en bout dans le réseaux homogène (avec des cellules statistiquement identiques).

La figure 5.9 montre le nombre de cellules visitées dans le réseau en fonction du taux d'arrivée total des nouvelles demandes de connexion Λ pour différentes valeurs de vitesses des utilisateurs. Comme prévu au vu de l'équation 5.25 et de la figure 5.7, le nombre de cellules visitées est fortement influencé par la vitesse des utilisateurs et est une fonction croissante du taux d'arrivée des nouvelles demandes de connexion.

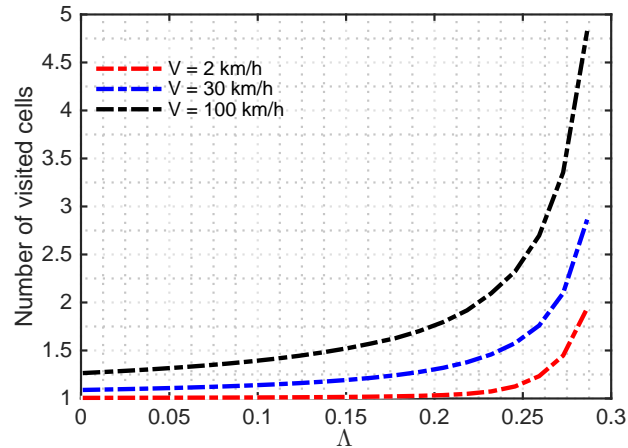


FIGURE 5.9 – Nombre moyen de cellules visitées en fonction du taux d'arrivée total de nouvelles demandes de connexion dans la cellule.

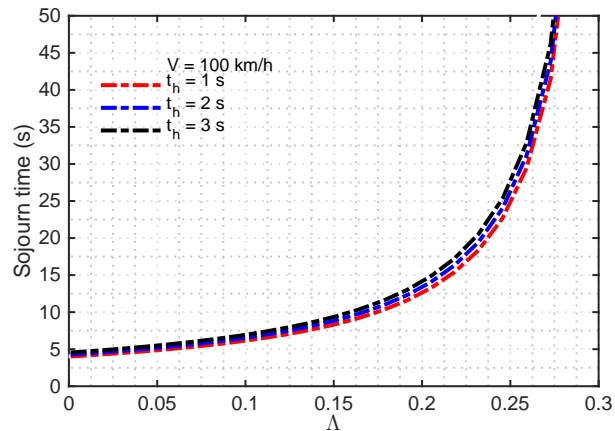


FIGURE 5.10 – Temps moyen de séjour dans le réseau en fonction du taux d'arrivée total de nouvelles demandes de connexion dans la cellule.

Étant donné que dans le système LTE seul le *hard handover* (*handover* avec interruption de service) est implémenté, le temps nécessaire pour effectuer un transfert doit tenir compte de l'interruption du service en raison d'éventuelles procédures de *handover*.

La figure 5.10 présente le temps de séjour des utilisateurs dans le réseau en fonction du taux d'arrivée total des nouvelles demandes de connexion Λ . Nous avons choisi trois valeurs pour la durée d'une procédure de *handover* t_h (1 s, 2 s, 3 s) et 100 km/h pour la vitesse des utilisateurs.

Sans surprise, le temps qu'un utilisateur met pour compléter un transfert augmente avec le taux d'arrivée total Λ . Cette durée de temps est également affectée par la durée de la procédure de transfert.

5.4.3 Impact de la mobilité des utilisateurs

Nous discutons maintenant l'impact de la mobilité des utilisateurs sur les performances. La figure 5.11 présente, pour un taux d'arrivée total de nouvelles demandes de connexion $\Lambda = 0,15$, le débit en fonction de la vitesse des utilisateurs. On note sur cette courbe le gain significatif dû à la mobilité comparé au scénario où tous les utilisateurs sont statiques. En particulier, le débit des utilisateurs mobiles augmente avec la vitesse et tend vers sa borne supérieure (le débit obtenu lorsque les utilisateurs ont une vitesse infinie). La figure 5.12 est l'analogue de la figure 5.11 en prenant en compte la durée de l'interruption du service en raison de la procédure de *handover* qui est fixée à 2 s. Cette courbe met en évidence l'impact de la procédure de *handover* sur le gain de débit. En particulier, pour une vitesse inférieure à 450 km/h, la mobilité entraîne un gain de débit ; au delà de cette valeur de vitesse, on observe une perte de débit par rapport à un scénario où tous les utilisateurs sont statiques.

Ces résultats numériques montrent comment le *handover* contrebalance l'amélioration des performances et permet de voir que le gain dû à la mobilité n'est pas fonction monotone de la vitesse des utilisateurs.

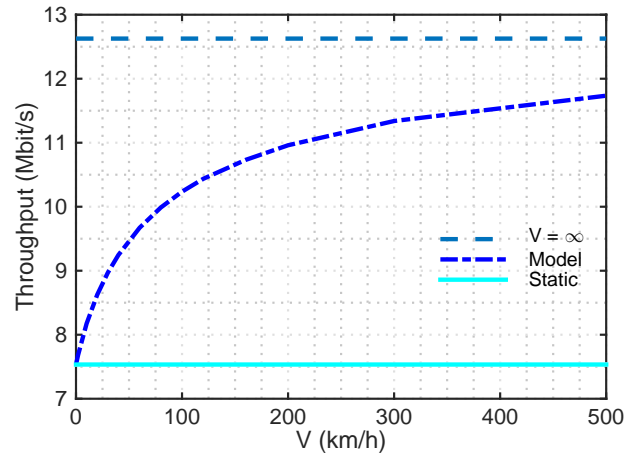


FIGURE 5.11 – Débits moyens obtenus par les utilisateurs dans le réseau en fonction de la vitesse des utilisateurs lorsque $\Lambda = 0,15$.

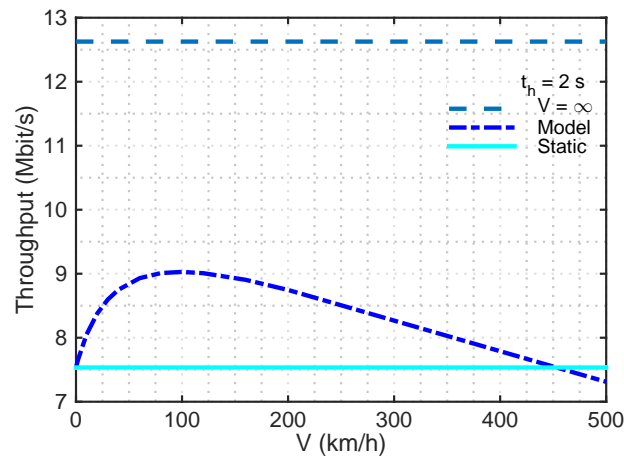


FIGURE 5.12 – Débits moyens obtenus par les utilisateurs dans le réseau en fonction de la vitesse des utilisateurs, en prenant en compte l'interruption de service dû au *handover* lorsque $\Lambda = 0,15$.

5.5 Dimensionnement

Finalement, nous proposons quelques exemples de dimensionnement afin de faire la démonstration des applications possibles de notre modèle multiclassés dédié aux réseaux homogènes. Dans cette optique, nous nous intéressons à la répartition des utilisateurs dans la cellule et nous définissons le problème suivant :

Problème

Quel est la proportion φ_j d'utilisateurs observant une condition de canal donnée ?

Le MCS utilisé pour une transmission de données étant fonction de la qualité du canal, répondre à cette question revient aussi à déterminer le taux d'utilisation d'un MCS donné dans la cellule. Pour ce faire, nous avons repris la cellule dont les caractéristiques sont présentées à la section 5.4 et nous avons modifié les rayons des zones afin que toutes les zones de la cellule soient de même taille en terme de surface, c'est-à-dire $S_j = S_{j-1}$ pour $j = 2, 3, 4$. Le but de cette modification est d'avoir le même taux d'arrivée d'utilisateurs dans chaque zone. Ceci permet d'observer l'impact de la mobilité et des conditions de canal sur la répartition des utilisateurs comme nous allons le voir dans la section suivante.

Solution

La figure 5.13 montre l'évolution du nombre d'utilisateurs dans chacune des 4 zones de la cellule en fonction du taux d'arrivée des utilisateurs dans la cellule, lorsque les utilisateurs se déplacent avec une vitesse $V = 30$ km/h.

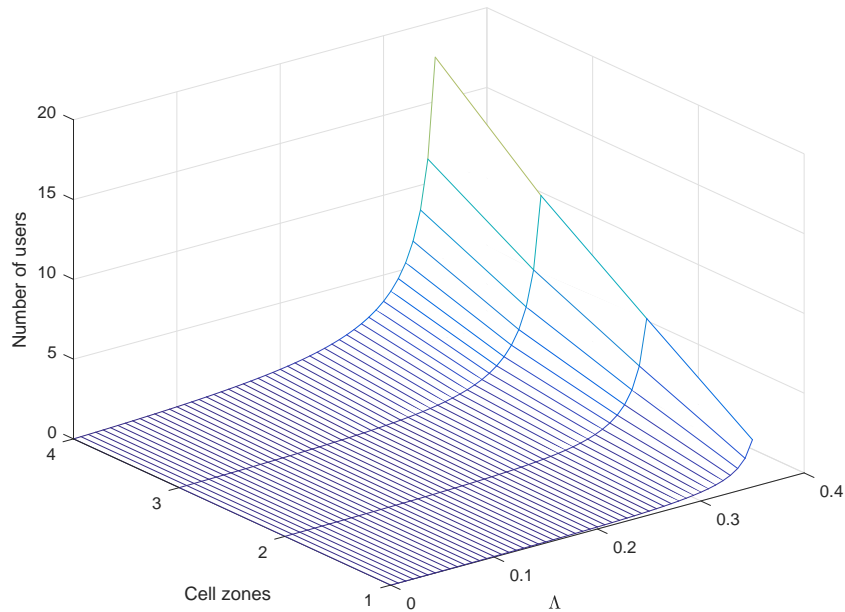


FIGURE 5.13 – Répartition des utilisateurs dans les zones de la cellule en fonction du taux d'arrivée des utilisateurs dans la cellule.

Afin de mieux présenter le phénomène observé sur la figure 5.13 et répondre au problème posé, la figure 5.14 présente la proportion moyenne des utilisateurs dans

chaque zone de la cellule, toujours lorsque les utilisateurs se déplacent avec une vitesse $V = 30$ km/h. Cette répartition est la répartition moyennée par rapport à la charge de la cellule. Cependant, précisons que ce résultat est représentatif de ceux obtenus dans les nombreuses configurations que nous avons pu tester. Dans le but de vérifier le gain apporté par la mobilité, nous présentons également la proportion d'utilisateurs par zone lorsque les utilisateurs sont tous statiques : figure 5.15.

La proportion d'utilisateurs dans chaque zone est calculée comment étant le rapport du nombre d'utilisateurs présents dans la zone considérée sur le nombre total d'utilisateurs présents dans la cellule :

$$\varphi_j = \frac{Q_j}{Q} \quad \text{avec} \quad Q = \sum_{j=1}^J Q_j. \quad (5.28)$$

Par ailleurs, ce calcul est effectué pour différentes valeurs de charge de la cellule allant de 0 à 1 sensiblement.

Comme le montrent ces deux figures, mais également la figure 5.13 les utilisateurs sont plus concentrés dans les zones périphériques de la cellule. Ceci s'explique par les mauvaises conditions de transmission de ces zones, car on y reste plus longtemps que dans les autres zones pour transférer une même quantité de données. On observe toutefois une meilleure répartition dans la cellule lorsque les utilisateurs sont mobiles comme le montre la figure 5.14.

Finalement, la proportion d'utilisateurs dans chaque zone de la cellule est la suivante : 8% pour la zone 1, 17% pour la zone 2, 28% pour la zone 3 et 48% pour la zone 4. Ceci revient à dire qu'à un instant t , 8% des utilisateurs en moyenne utilisent le MCS 28, 17% le MCS 23, 28% le MCS 16 et 48% le MCS 6.

5.6 Synthèse

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté notre modèle analytique pour les macrocellules de types LTE transportant du trafic élastique. Ce modèle a été spécifiquement développé en mettant l'accent sur la simplicité de résolution afin d'obtenir des expressions faciles à utiliser de l'ensemble des paramètres de performances et donc d'offrir des résultats instantanés. Le modèle proposé permet de prendre en compte le déplacement des utilisateurs pendant l'utilisation des ressources du réseau, ce qui est le comportement habituel des utilisateurs des réseaux cellulaires de nouvelle génération.

Nous avons montré que ce modèle est conforme aux limites analytiques connues correspondant aux utilisateurs statiques et des utilisateurs avec une vitesse infinie, et permet d'obtenir les performances avec une très bonne précision dans le cas des vitesses réalistes. Notre modèle confirme que la mobilité peut améliorer les performances des utilisateurs dans une cellule donnée et permet de quantifier le gain. Il fournit également des performances de bout en bout des utilisateurs dans un réseau de cellules statistiquement équivalentes. Cela a permis de montrer que le gain de performance dû à la mobilité n'est pas une fonction monotone de la vitesse.

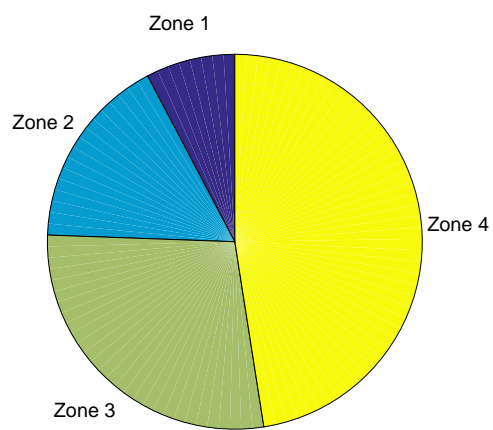


FIGURE 5.14 – Proportion d'utilisateurs dans chaque zone de la cellule lorsque les utilisateurs sont mobiles avec une vitesse $V = 30$ km/h.

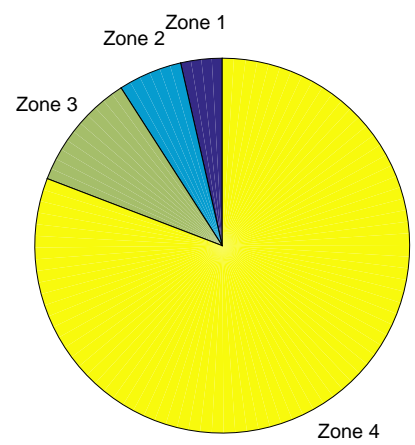


FIGURE 5.15 – Proportion d'utilisateurs dans chaque zone de la cellule lorsque les utilisateurs sont tous statiques.

Chapitre 6

Modèles pour des réseaux hétérogènes avec différentes classes d'utilisateurs

6.1 Introduction

Dans des deux chapitres précédents, nous avons présenté nos modèles analytiques pour les petites cellules à capacité constante et les macrocellules à capacité variable. De plus, nous avons vu que ces différents modèles ont été développés pour obtenir les performances d'un seul type d'utilisateurs. Or les profils des utilisateurs des réseaux cellulaires actuels et à venir sont assez divers. En outre, les réseaux cellulaires sont constitués de cellules hétérogènes donc la taille et les ressources disponibles varient. Il serait donc important de disposer de modèles pour l'évaluation des performances de bout en bout des utilisateurs dans les réseaux hétérogènes tout en tenant compte de la diversité de leur profils.

Ce sixième chapitre présente nos modèles dédiés aux réseaux hétérogènes abritant différentes classes d'utilisateurs.

Tout d'abord, nous débutons ce chapitre en nous focalisant sur la mobilité intracellulaire et proposons un modèle pour les performances dans une macrocellule avec plusieurs classes d'utilisateurs. Ensuite, nous étendons l'approche pour aboutir à un modèle pour des réseaux hétérogènes. Enfin, nous présentons des résultats de performance des deux modèles.

6.2 Système

6.2.1 Réseaux hétérogènes

Considérons un réseau LTE composé de N macrocellules de capacité différentes. La taille de la zone géographique couverte par une cellule variant en fonction de l'environnement à couvrir et de la densité des utilisateurs, les cellules ne sont pas toutes de même taille. Chaque eNodeB (station de base dans le LTE) sert les utilisateurs situés

dans la cellule correspondante via une liaison descendante partagée. Pour un nombre donné d'utilisateurs actifs dans la cellule n , les ressources (*Resource Blocks* en LTE) de l'eNodeB sont partagées équitablement entre ces utilisateurs. La capacité d'un utilisateur, c'est-à-dire le débit maximal que peut obtenir un utilisateur qui est seul dans une cellule considérée, dépend de ces conditions radios comme indiqué à la section 1.2.2.

Ainsi, la cellule n du réseau peut être divisée en J_n régions ou zones de transmission, caractérisées chacune par sa capacité [78]. Chaque zone correspond à un MCS utilisé pour la transmission ; les utilisateurs d'une même zone ont les mêmes conditions radio en moyenne et utilisent donc le même MCS. Nous rappelons que le réseau est hétérogène, donc le nombre de zones n'est pas identique entre les cellules.

Un utilisateur de la zone (j, n) , c'est-à-dire actuellement présent dans la région j , $j = 1, \dots, J_n$ de la cellule n , $n = 1, \dots, N$, obtiendra un débit $C_{j,n}$, s'il est seul dans cette cellule. Même si cela n'est pas nécessaire pour les développements de ce travail, nous supposons comme dans [81] et [82], que les J_n zones de transmission de la cellule n forment des cercles concentriques de rayon $R_{j,n}$, où la zone 1 est la zone centrale et la zone J_n est la zone périphérique. La figure 6.1 montre un exemple de réseau de 3 macrocellules.

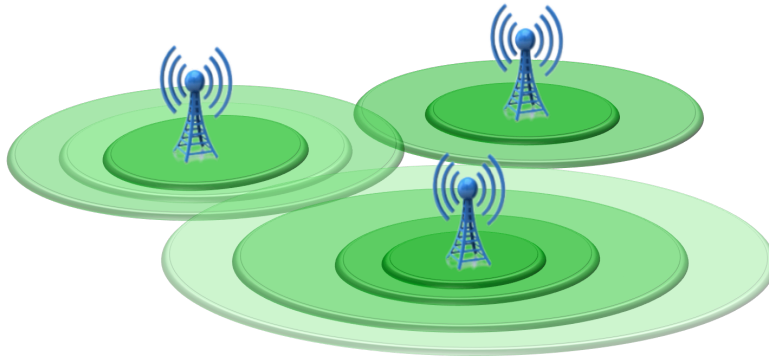


FIGURE 6.1 – Exemple de réseau cellulaire constitué de 3 macrocellules.

6.2.2 Modèle de mobilité et trafic

Les utilisateurs sont mobiles, par conséquent les utilisateurs connectés à un eNodeB, c'est-à-dire présents dans une cellule, peuvent changer de zone (MCS) en migrant vers une autre zone dans la même cellule ou changer de cellule pendant leur transfert. Plus précisément, Les utilisateurs présents dans la cellule n peuvent changer de zone en restant dans la cellule, ou la quitter soit parce qu'ils ont terminé leur transfert et quittent définitivement le réseau, soit parce qu'ils ont effectué un *handover* de la cellule n pour une cellule voisine en raison de leur mobilité et en étant toujours actifs. Nous considérons un nombre arbitraire K de types d'utilisateurs, chaque type correspondant à une taille de données Σ^k à transférer et à une vitesse V^k , $k = 1, \dots, K$ de déplacement.

Nous considérons le modèle de mobilité présenté au chapitre 1. Nous notons par $\Theta_{j,n}^k$ le temps de séjour physique d'un utilisateur de type k dans la région j de la cellule n à chaque visite de cette région, c'est-à-dire la durée pendant laquelle il reste physiquement dans la zone (j, n) . Cette durée est comptée à partir du moment où il apparaît dans la zone (soit parce qu'il commence son téléchargement dans cette zone, soit parce qu'il entre dans la zone venant d'une zone ou d'une cellule voisine) jusqu'au moment où il quitte la zone (en étant toujours actif ou non) pour une zone ou cellule voisine, ou quitte définitivement le réseau parce qu'il a terminé son transfert.

Nous considérons que les nouvelles demandes de connexion arrivent dans la cellule n du réseau selon un processus de Poisson de taux Λ_n . Un utilisateur qui émet une nouvelle demande de connexion a une probabilité $p_{j,n}$ d'être initialement dans la zone (j, n) et donc de commencer son téléchargement dans la région j de la cellule n et une probabilité q^k d'être de type k . En conséquence, les nouvelles demandes de connexion des utilisateurs de type k arrivent dans la zone (j, n) selon un processus de Poisson de taux $\Lambda_{j,n}^k = p_{j,n}q^k\Lambda_n$. Nous définissons $P_{j \rightarrow i,n}$, la probabilité qu'un utilisateur (quel que soit son type) qui quitte physiquement (c'est-à-dire actif ou non) la zone (j, n) se déplace vers la zone voisine (i, n) de la même cellule. Nous notons par $P_{j \rightarrow 0,n}$ la probabilité qu'un utilisateur quitte la cellule n à partir de la zone (j, n) , et par $P_{0 \rightarrow j,n}$, la probabilité qu'un utilisateur entre dans la cellule n par la zone (j, n) . Notez que lorsque les zones forment des cercles concentriques, les utilisateurs ne peuvent quitter et entrer dans une cellule qu'à partir de la zone J_n . Nous définissons également $\Psi_{m \rightarrow n}$ la probabilité qu'un utilisateur (quel que soit son type) qui quitte physiquement (c'est-à-dire, actif ou non) la cellule m aille dans la cellule n .

Dès qu'une nouvelle requête arrive, elle déclenche le début d'une nouvelle transmission de données (dans la zone où la requête apparaît). Cette transmission se termine lorsque l'utilisateur a terminé son transfert quel que soit le nombre de zones et/ou de cellules qu'il a visitées entre-temps.

Nous considérons d'abord que les variables aléatoires Σ^k et $\Theta_{j,n}^k$ sont exponentiellement distribuées. Cette hypothèse est faite pour les mêmes raisons que celles de la section 5.2.1. L'impact de ces hypothèses sera examiné à la section 6.5.3.

6.3 Modèle

6.3.1 Modèle d'une macrocellule isolée

Pour des raisons de clarté, nous commençons par ne considérer dans cette section que la mobilité intracellulaire. La mobilité intercellulaire sera abordée à la section 6.3.3. Les utilisateurs d'une même cellule ont la possibilité de changer de zone de transmission (MCS) en migrant vers une autre zone. Cependant, les utilisateurs ne peuvent pas quitter la cellule avant d'avoir terminé leur téléchargement, c'est-à-dire dans la cellule considérée notée n , $P_{J_n \rightarrow 0,n} = 0$ et $P_{J_n \rightarrow J_n-1,n} = 1$.

Inversement, les utilisateurs actifs ne peuvent pas entrer dans la cellule en venant

de cellules voisines.

Le modèle représente l'occupation de la cellule n par une file d'attente *Processor Sharing* multi-classes avec $J_n * K$ classes comme illustré sur la figure 6.2. Chaque classe de la file d'attente correspond à une zone de la cellule et un type d'utilisateurs. C'est-à-dire que les utilisateurs du même type présents dans la même zone de la cellule appartiennent à une classe. Les clients de classe $(j, n)^k$ arrivent dans la file d'attente selon un processus de Poisson de taux $\lambda_{j,n}^k$, $j = 1, \dots, J_n$ et $k = 1, \dots, K$. Il est important de noter que $\lambda_{j,n}^k$ est différent du taux $\Lambda_{j,n}^k$ des nouvelles demandes de connexion des utilisateurs de type k apparaissant dans la zone (j, n) , car il doit inclure l'arrivée des utilisateurs venant des autres zones de la cellule n tout en restant actifs. Si nous notons par $\Lambda_{j \rightarrow i, n}^k$ le nombre moyen d'utilisateurs actifs de type k passant de la zone (j, n) à la zone (i, n) par unité de temps, nous avons :

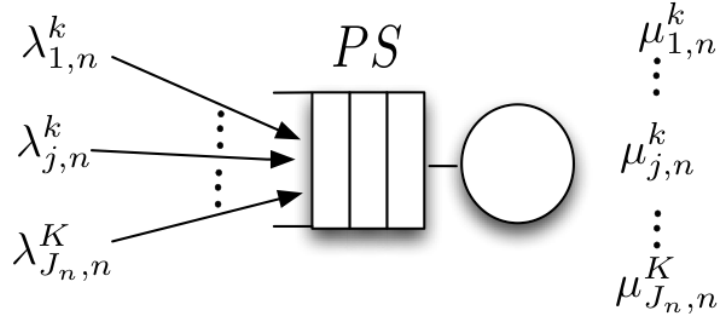


FIGURE 6.2 – Files PS multiclassées avec $J_n * K$ classes

$$\begin{cases} \lambda_{1,n}^k = \Lambda_{1,n}^k + \Lambda_{2 \rightarrow 1, n}^k \\ \lambda_{j,n}^k = \Lambda_{j,n}^k + \Lambda_{j-1 \rightarrow j, n}^k + \Lambda_{j+1 \rightarrow j, n}^k, \quad j = 2, \dots, J_n - 1 \\ \lambda_{J_n, n}^k = \Lambda_{J_n, n}^k + \Lambda_{J_n-1 \rightarrow J_n, n}^k \end{cases} \quad (6.1)$$

Le taux de service de la classe $(j, n)^k$ peut à son tour être exprimé comme suit :

$$\mu_{j,n}^k = \frac{C_{j,n}}{\bar{x}_{j,n}^k}, \quad (6.2)$$

où $\bar{x}_{j,n}^k$ est défini comme le volume moyen réellement transféré par l'utilisateur de type k à chaque visite de la zone (j, n) . Il reste à estimer les paramètres d'entrée de la file d'attente PS, à savoir $\lambda_{j,n}^k$ et $\mu_{j,n}^k$ ou plus précisément tous les $\Lambda_{j \rightarrow i, n}^k$ et $\bar{x}_{j,n}^k$. Si les paramètres $\lambda_{j,n}^k$ et $\mu_{j,n}^k$ sont connus, les résultats standards des files d'attente PS multi-classes stationnaires peuvent être facilement appliqués pour calculer le débit moyen $\bar{\gamma}_{j,n}$ obtenu par les utilisateurs (quels que soient leurs types) dans la zone (j, n) de la cellule lors de leur transfert, c'est-à-dire :

$$\bar{\gamma}_{j,n} = C_{j,n}(1 - \rho_n), \quad (6.3)$$

où ρ_n est la charge de la cellule et est donnée par :

$$\rho_n = \sum_{j=1}^{J_n} \sum_{k=1}^K \rho_{j,n}^k \quad \text{avec} \quad \rho_{j,n}^k = \frac{\lambda_{j,n}^k}{\mu_{j,n}^k}. \quad (6.4)$$

Afin d'estimer les premiers paramètres manquants $\bar{x}_{j,n}^k$, requis dans l'expression de $\mu_{j,n}^k$, nous utilisons la méthodologie développée dans le chapitre 4 pour une cellule avec une seule zone et nous l'appliquons individuellement à chaque zone de la cellule. Comme montré au chapitre 4, dans le cas particulier où Σ^k et $\Theta_{j,n}^k$ sont exponentiellement distribués, $\bar{x}_{j,n}^k$ est lié au débit moyen $\bar{\gamma}_{j,n}$ obtenu par les utilisateurs dans la zone (j, n) et au temps moyen $\mathbb{E}(\Theta_{j,n}^k)$ qu'un utilisateur de type k passe physiquement dans la zone (j, n) :

$$\bar{x}_{j,n}^k = \frac{\mathbb{E}(\Sigma^k) \mathbb{E}(\Theta_{j,n}^k) \bar{\gamma}_{j,n}}{\mathbb{E}(\Sigma^k) + \mathbb{E}(\Theta_{j,n}^k) \bar{\gamma}_{j,n}}. \quad (6.5)$$

Il reste à estimer maintenant les paramètres manquants $\Lambda_{j \rightarrow i, n}^k$ apparaissant dans les expressions de $\lambda_{j,n}^k$. Si nous notons par $h_{j,n}^k$ la probabilité de *handover* des utilisateurs de type k dans la zone (j, n) , c'est-à-dire la probabilité qu'un utilisateur de type k quitte la zone (j, n) sans avoir terminé son transfert, on peut exprimer $\Lambda_{j \rightarrow j+1, n}^k$ et $\Lambda_{j \rightarrow j-1, n}^k$ comme suit :

$$\begin{cases} \Lambda_{j \rightarrow j+1, n}^k = \lambda_{j,n}^k h_{j,n}^k P_{j \rightarrow j+1, n}, & j = 1, \dots, J_n - 1 \\ \Lambda_{j \rightarrow j-1, n}^k = \lambda_{j,n}^k h_{j,n}^k P_{j \rightarrow j-1, n}, & j = 2, \dots, J_n \end{cases} \quad (6.6)$$

Les probabilités de *handover* $h_{j,n}^k$ peuvent à leur tour être exprimées comme suit :

$$h_{j,n}^k = \int_0^{+\infty} \mathbb{P} \left[\Theta_{j,n}^k \leq \frac{y}{\bar{\gamma}_{j,n}} \right] f_{\Sigma^k}(y) dy. \quad (6.7)$$

En supposant que Σ^k et $\Theta_{j,n}^k$ sont exponentiellement distribués, l'intégrale précédente devient

$$h_{j,n}^k = \frac{\mathbb{E}(\Sigma^k)}{\mathbb{E}(\Sigma^k) + \mathbb{E}(\Theta_{j,n}^k) \bar{\gamma}_{j,n}}. \quad (6.8)$$

Nous nous retrouvons finalement avec un système de 7 équations dépendantes (6.1-6.4 , 6.5, 6.6, 6.8) que nous résolvons en utilisant une technique itérative à point fixe. L'algorithme de ce point fixe est semblable à l'algorithme de point fixe du chapitre 5 qui est présenté à l'annexe A.

6.3.2 Stabilité et bornes de performances

Avant d'aller plus loin et de présenter les performances obtenues du modèle, il est nécessaire d'établir la région de stabilité de ce dernier. Les performances du système que nous considérons, c'est-à-dire un système avec des utilisateurs mobiles se déplaçant physiquement dans la cellule avec une vitesse V^k , sont bornées par celle de deux systèmes dans lesquels tous les utilisateurs ont la même vitesse. Dans le premier, les

utilisateurs sont tous statiques ($V^{st} = 0$), et dans le second, les utilisateurs ont une vitesse infinie ($V^\infty = \infty$). Notons par $\mathbb{E}(\Sigma) = \sum_{k=1}^K q^k \mathbb{E}(\Sigma^k)$ la taille moyenne des données à télécharger par un utilisateur (quel que soit son type). Le modèle correspondant au premier système où les utilisateurs sont tous statiques est la file d'attente PS multi-classes classique avec les paramètres $\lambda_{j,n} = \Lambda_{j,n}$ et $\mu_{(j,n)} = \frac{C_{j,n}}{\mathbb{E}(\Sigma)}$. Ce système est équivalent à une cellule avec une seule zone ayant une capacité équivalente C^{st} égale à la moyenne harmonique des capacités $C_{j,n}$:

$$\frac{1}{C^{st}} = \sum_{j=1}^{J_n} \frac{p_{j,n}}{C_{j,n}}, \quad (6.9)$$

$p_{j,n}$ étant la probabilité qu'une nouvelle demande de connexion apparaisse dans la zone (j, n) . La charge de ce système est donc définie comme suit :

$$\rho_n^{st} = \frac{\mathbb{E}(\Sigma) \sum_{j=1}^{J_n} \lambda_{j,n}}{C^{st}}. \quad (6.10)$$

La condition nécessaire et suffisante pour sa stabilité est donc :

$$\rho_n^{st} < 1, \text{ c'est-à-dire, } \Lambda_n = \sum_{j=1}^{J_n} \lambda_{j,n} < \frac{C^{st}}{\mathbb{E}(\Sigma)}. \quad (6.11)$$

Comme indiqué dans [51], le second système, où les utilisateurs ont une vitesse infinie, est équivalent à une file d'attente PS simple (avec une seule classe) avec un taux d'arrivée $\Lambda_n = \sum_{j=1}^{J_n} \Lambda_{j,n}$, et un taux de service $\mu^\infty = \frac{C^\infty}{\mathbb{E}(\Sigma)}$ où C^∞ est égal à la moyenne arithmétique de la capacité de chaque zone :

$$C^\infty = \sum_{j=1}^{J_n} p_{j,n} C_{j,n}. \quad (6.12)$$

La condition nécessaire et suffisante pour la stabilité de ce second système est donc donnée par :

$$\rho_n^\infty < 1, \text{ i.e., } \Lambda_n = \sum_{j=1}^{J_n} \Lambda_{j,n} < \frac{C^\infty}{\mathbb{E}(\Sigma)}. \quad (6.13)$$

Le théorème 2 de [51] prouve que, si le CDF associé à la variable aléatoire caractérisant la taille des données est concave (ce qui est le cas de la distribution exponentielle), la charge ρ de notre système décrit dans la section 6.3.1 est bornée comme suit :

$$\rho_n^\infty \leq \rho_n \leq \rho_n^{st}. \quad (6.14)$$

Il résulte de l'équation 6.14 et du théorème 1 de [51] que $\Lambda_n < \frac{C^\infty}{\mathbb{E}(\Sigma)}$ est une condition nécessaire et suffisante pour la stabilité du système.

6.3.3 Modèle pour un réseau de macrocellules hétérogènes

Nous présentons maintenant le modèle pour un réseau composé de N macrocellules hétérogènes.

Un utilisateur présent dans une cellule du réseau peut, lors de son téléchargement, non seulement changer de zone, mais aussi changer de cellule.

Notez que les *handovers* ne peuvent avoir lieu que sur le bord de la cellule, c'est-à-dire dans la zone J_n de la cellule n . Inversement, les utilisateurs qui arrivent dans la cellule n venant des cellules voisines commencent leurs transmissions dans cette cellule dans la zone J_n . Pour une cellule placée dans un réseau de macrocellules, nous pouvons simplement réécrire le système 6.1 et ajouter aux taux d'arrivée $\lambda_{J_n,n}^k$ (avec $k = 1, \dots, K$) des classes correspondant à la zone externe de la cellule, le taux d'arrivée des utilisateurs actifs de type k quittant les cellules voisines pour la cellule n :

$$\begin{cases} \lambda_{1,n}^k = \Lambda_{1,n}^k + \Lambda_{2 \rightarrow 1,n}^k \\ \lambda_{j,n}^k = \Lambda_{j,n}^k + \Lambda_{j-1 \rightarrow j,n}^k + \Lambda_{j+1 \rightarrow j,n}^k, j = 2, \dots, J_n - 1 \\ \lambda_{J_n,n}^k = \Lambda_{J_n,n}^k + \Lambda_{J_n-1 \rightarrow J_n,n}^k + \sum_{m=1, m \neq n}^N \nu_{m \rightarrow n}^k \end{cases} \quad (6.15)$$

où $\nu_{m \rightarrow n}^k$ est le nombre moyen d'utilisateurs actifs de type k qui quittent la cellule m pour la cellule n par unité de temps. Par conséquent, le taux d'arrivée total des utilisateurs de type k dans la cellule n devient

$$\lambda_n^k = \Lambda_n^k + \sum_{m=1, m \neq n}^N \nu_{m \rightarrow n}^k, \quad (6.16)$$

où $\Lambda_n^k = q_k \Lambda_n$ est le taux de nouvelles demandes de connexion de type k dans la cellule n .

La question maintenant est : comment estimer ν_m^k ?

Soit H_m^k le taux de *handover* des utilisateurs de type k dans la cellule m , c'est-à-dire la probabilité qu'un utilisateur actif de type k présent dans la cellule m doive migrer vers une autre cellule avant de terminer son service. $\nu_{m \rightarrow n}^k$ peut s'écrire :

$$\nu_{m \rightarrow n}^k = \lambda_m^k H_m^k \Psi_{m \rightarrow n}. \quad (6.17)$$

La probabilité de *handover* H_m^k est calculée comme étant le rapport entre le nombre moyen d'utilisateurs actifs de type k quittant la cellule m par unité de temps (à partir de la zone J_m) sans avoir achevé leur transfert et le nombre total d'utilisateurs de type k qui quittent la cellule par unité de temps, c'est-à-dire :

$$H_m^k = \frac{\bar{Q}_{J_m,n}^k \frac{P_{J_m \rightarrow 0,m}}{\mathbb{E}(\Theta_{J_m,m}^k)}}{\lambda_m^k}, \quad (6.18)$$

avec

$$\bar{Q}_{J_m,m}^k = \frac{\rho_{J_m,m}^k}{1 - \rho_m}, \quad (6.19)$$

où ρ_m et $\rho_{J_m, m}^k$ sont calculés comme dans l'équation 6.4

Nous nous retrouvons finalement avec un système de 7 équations dépendantes (6.2, 6.4, 6.15-6.19) qui est résolu en utilisant une technique itérative de point fixe. L'algorithme de ce point fixe est présenté à l'annexe B.

6.4 Résultats de performance

6.4.1 Performance des utilisateurs de type k dans une cellule isolée

Nous déduisons maintenant du modèle de la section 5.3.1, les performances des utilisateurs actifs de type k dans la cellule considérée.

À partir des résultats classiques des files d'attente PS, nous pouvons déterminer le nombre moyen de clients de chaque classe, correspondant au nombre moyen d'utilisateurs actifs de chaque type dans chaque zone de la cellule, c'est-à-dire :

$$\bar{Q}_{j,n}^k = \frac{\rho_{j,n}^k}{1 - \rho_n}. \quad (6.20)$$

Ainsi, le nombre moyen d'utilisateurs de type k dans la cellule est :

$$\bar{Q}^k = \sum_{j=1}^{J_n} \bar{Q}_{j,n}^k. \quad (6.21)$$

De la loi Little, on déduit le temps moyen de séjour \bar{R}^k d'un utilisateur actif de type k dans la cellule. C'est le temps entre le moment où il apparaît dans la cellule (à cause d'une nouvelle demande de transfert) et le moment où il termine son transfert :

$$\bar{R}^k = \frac{Q^k}{\sum_{j=1}^{J_n} \Lambda_{j,n}^k}. \quad (6.22)$$

Nous calculons ensuite le débit moyen $\bar{\gamma}_k$ obtenu par un utilisateur de type k lors de son transfert dans la cellule :

$$\bar{\gamma}^k = \sum_{j=1}^{J_n} \bar{\gamma}_{j,n} \alpha_{j,n}^k, \quad (6.23)$$

avec $\alpha_{j,n}^k = \frac{\bar{Q}_{j,n}^k}{Q^k}$ la proportion d'utilisateurs actifs de type k présents dans la zone (j, n) .

6.4.2 Performance de bout en bout des utilisateurs de type k

Nous portons maintenant notre attention sur les performances de bout en bout des utilisateurs dans un réseau de macrocellules hétérogènes.

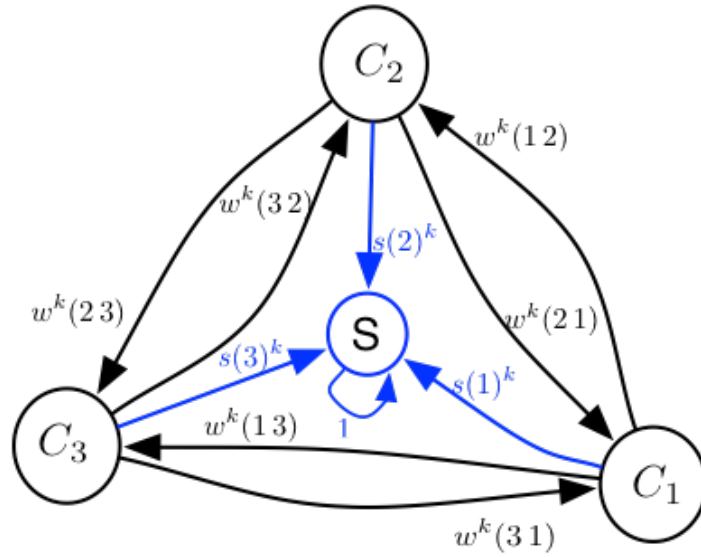


FIGURE 6.3 – chaîne de Markov à temps discret (CMTD) représentant le réseau.

Soit $\omega^k(m, n)$ la probabilité qu'un utilisateur de type k quitte la cellule m pour la cellule n au cours de son service. Par exemple, sur la figure 6.3 (en omettant les flèches en bleues et l'état s), $\omega^k(1, 2)$ correspond à la probabilité qu'un utilisateur de type k quitte la cellule 1 (c.-à-d. C_1 dans la figure) pour la cellule 2 (resp. C_2).

$\omega^k(m, n)$ est simplement la probabilité de *handover* H_m^k des utilisateurs de type k dans la cellule m multiplié par la probabilité $\Psi_{m \rightarrow n}$ qu'un utilisateur qui quitte la cellule m aille dans la cellule n .

$$\omega^k(m, n) = H_m^k \Psi_{m \rightarrow n}. \quad (6.24)$$

Afin de déduire les performances de bout en bout d'un utilisateur dans le réseau, nous devons d'abord calculer le nombre moyen de fois qu'un utilisateur visite chaque cellule avant de terminer son téléchargement. Notre approche consiste à représenter la topologie du réseau sous la forme d'une chaîne de Markov à temps discret (CMTD), où chaque cellule est représentée par un état de la CMTD et les possibilités de changement de cellule par les transitions entre les états avec les probabilités $\omega^k(m, n)$ représentant les probabilités de transition. Cependant, nous devons également tenir compte du fait qu'un utilisateur finit éventuellement son téléchargement. Cela signifie qu'un utilisateur du réseau atteindra un état d'où il ne téléchargera plus, et par conséquent, n'effectuera aucun autre *handover*. Nous représentons cela par un état absorbant noté s sur la figure. Une fois atteint cet état, l'utilisateur a terminé son téléchargement et n'utilisera plus les ressources du réseau pour ce fichier. Notez que, si l'utilisateur a un autre fichier à télécharger, nous considérons cela comme une nouvelle arrivée dans le système. La CMTD absorbante résultante est représentée sur la figure 6.3 avec l'état s représentant l'état absorbant. $s^k(n)$ correspond à la probabilité qu'un utilisateur de type k termine

son téléchargement dans la cellule n . En d'autres termes, $s^k(n)$ est la probabilité d'atteindre l'état absorbant s , avec $s^k(n) = 1 - H_n^k$. Rappelons que cette chaîne de Markov n'est pas irréductible. La matrice de transition correspondante peut être écrite sous la forme d'une matrice de blocs [83] : $M^k = \begin{pmatrix} I & 0 \\ A^k & B^k \end{pmatrix}$ où I est une matrice carrée identité, 0 , une matrice de zéros, la matrice carrée B^k décrit les probabilités de mouvement parmi les états transitoires de la chaîne, soit les probabilités de mouvement parmi les cellules du réseau ($B_{mn}^k = \omega^k(m, n)$), tandis que la matrice A^k donne les probabilités d'absorption en une étape, soit A_m^k probabilités de terminer le téléchargement en étant dans la cellule m . Le nombre moyen de fois que le processus décrit par cette chaîne passe dans état transitoire n en partant de l'état transitoire m , c'est-à-dire le nombre de fois qu'un utilisateur de type k visite la cellule n conditionnée par le fait qu'il a débuté son transfert dans la cellule m , est donné par l'élément F_{mn}^k de la matrice fondamentale F^k . La matrice fondamentale F^k se calcule comme suit :

$$F^k = (I - B^k)^{-1}. \quad (6.25)$$

Notons \bar{T}^k le temps de séjour moyen d'un utilisateur de type k dans le réseau lors de son transfert. Premièrement, nous calculons le nombre moyen de cellules qu'un utilisateur visite avant de compléter son téléchargement. Comme la taille Σ^k des données à transférer par un utilisateur est exponentiellement distribuée, \bar{T}^k s'exprime comme suit :

$$\bar{T}^k = \sum_{n=1}^N \bar{R}_n^k \sum_{m=1}^N F_{mn}^k \frac{\Lambda_m^k}{\sum_{i=1}^N \Lambda_i^k}, \quad (6.26)$$

où \bar{R}_n^k est le temps moyen qu'un utilisateur de type k passe dans la cellule n à chaque visite de la cellule, \bar{R}_n^k est exprimé à l'équation 6.22. $\frac{\Lambda_m^k}{\sum_{i=1}^N \Lambda_i^k}$ est la probabilité qu'un utilisateur de type k démarre son service dans le réseau dans la cellule m et $\sum_{m=1}^N F_{mn}^k \frac{\Lambda_m^k}{\sum_{i=1}^N \Lambda_i^k}$ est le nombre de fois qu'un utilisateur de type k visite la cellule n pendant son transfert. Par conséquent, le débit de bout en bout obtenu par un utilisateur de type k lors de son téléchargement dans le réseau est donné par :

$$\bar{\Gamma}^k = \frac{\mathbb{E}(\Sigma^k)}{\bar{T}^k}. \quad (6.27)$$

La probabilité de *handover* des utilisateurs de type k dans le réseau, c'est-à-dire la probabilité pour un utilisateur de type k de changer de cellule au cours de son transfert, est donnée par :

$$\bar{H}^k = \sum_{n=1}^N H_n^k \beta_n \quad \text{avec} \quad \beta_n = \frac{\sum_{m=1}^N F_{mn}^k \frac{\Lambda_m^k}{\sum_{i=1}^N \Lambda_i^k}}{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N F_{mn}^k \frac{\Lambda_m^k}{\sum_{i=1}^N \Lambda_i^k}} \quad (6.28)$$

où β_n est la probabilité pour un utilisateur de type k de visiter la cellule n pendant son transfert.

Le nombre moyen \bar{n}_c^k de cellules visitées par un utilisateur de type k et le nombre moyen \bar{n}_h^k de *handovers* effectués par un utilisateur de type k avant la fin de son service peuvent être exprimé par :

$$\bar{n}_c^k = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N F_{mn}^k \frac{\Lambda_m^k}{\sum_{i=1}^N \Lambda_i^k} \quad \text{et} \quad \bar{n}_h^k = \bar{n}_c^k - 1. \quad (6.29)$$

6.5 Validation

Nous proposons dans cette section de valider les modèles proposés. Dans ce but, nous comparons les résultats fournis par les modèles à ceux fournis par le simulateur d'événements discrets que nous avons préalablement étendu pour prendre en compte les réseaux hétérogènes.

Nous considérons un réseau de $N = 3$ cellules comme présenté sur la figure 6.1. Pour simplifier la présentation comme expliqué dans la section 6.2.1, les zones des cellules forment des cercles concentriques autour de l'antenne. Chaque cellule dispose de 100 ressources blocs pour le sens descendant et la cellule 1 (respectivement 2 et 3) offre aux utilisateurs quatre MCS (28, 23, 16, 6) (respectivement trois MCS (28, 23, 16) et deux MCS (28, 23)). Il en résulte des zones de transmission de capacité correspondante présentées dans la table 6.1 [80]. Pour la surface des zones, nous utilisons les rayons présentés dans la table 6.1 correspondant au modèle des cercles concentriques des cellules. Nous supposons que le réseau est visité par deux types d'utilisateurs, qui se déplacent à différentes vitesses : $V^1 = 5$ km/h et $V^2 = 50$ km/h ; la taille moyenne des données pour chaque type d'utilisateurs est fixée à $\mathbb{E}(\Sigma^1) = 20$ Mo et $\mathbb{E}(\Sigma^2) = 10$ Mo. La probabilité qu'un utilisateur soit de chaque type est $q^1 = 0,6$, $q^2 = 0,4$. Les paramètres restants, c'est-à-dire la probabilité pour un utilisateur de démarrer son téléchargement dans la zone j d'une cellule donnée, la probabilité de transition entre zones d'une cellule et entre cellules, et le temps de séjour dans une cellule donnée à chaque visite, sont calculés selon les estimations de la section 5.2.3 en remplaçant V par V^k pour les utilisateurs de type k .

TABLE 6.1 – Paramètres des cellules

Cellules	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4
Cellule 1 : Radius (m)	$R_1 = 100$	$R_2 = 150$	$R_3 = 200$	$R_4 = 250$
Capacité (Mbits/s)	$C_1 = 75$	$C_2 = 51$	$C_3 = 31$	$C_4 = 10$
Cellule 2 : Radius	$R_1 = 100$	$R_2 = 150$	$R_3 = 200$	
Capacité (Mbits/s)	$C_1 = 75$	$C_2 = 51$	$C_3 = 31$	
Cellule 3 : Radius (m)	$R_1 = 100$	$R_2 = 150$		
Capacité (Mbits/s)	$C_1 = 75$	$C_2 = 51$		

6.5.1 Performance des utilisateurs dans une cellule isolée

Afin de valider le modèle proposé pour une cellule isolée abritant plusieurs types d'utilisateurs, nous illustrons dans cette section d'abord quelques résultats de perfor-

mance au modèle développé à la section 6.3.1. Pour ce faire, nous ne considérons dans un premier temps que la première cellule (cellule à quatre zones de transmission).

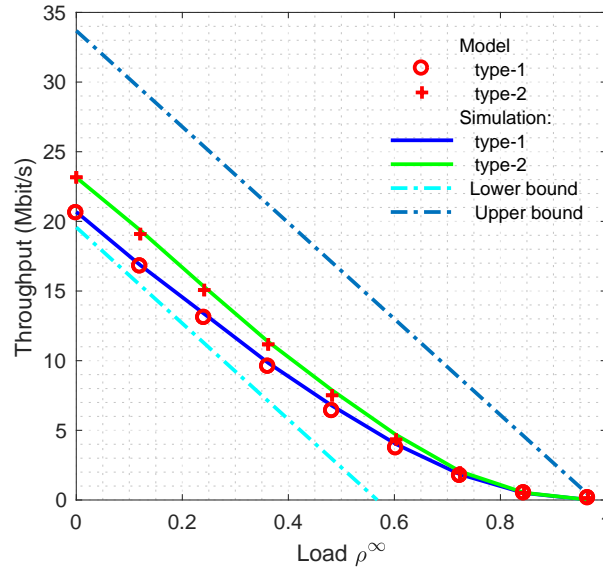


FIGURE 6.4 – Débits obtenu par les utilisateurs de chaque type dans la cellule en fonction de la charge de la cellule.

Les figures 6.4 et 6.5 montrent respectivement la comparaison du débit et du temps de séjour dans la cellule de chaque type d'utilisateurs en fonction de la charge ρ^∞ . On peut voir sur ces courbes que les résultats du modèle sont très proches des résultats de simulation avec une erreur relative d'environ 6% en moyenne et moins de 10% dans le pire des cas. Comme expliqué dans la section 6.3.2, le débit des utilisateurs mobiles est borné par le débit obtenu lorsque tous les utilisateurs sont statiques (borne inférieure) et le débit obtenu lorsqu'ils ont une vitesse infinie (borne supérieure). Comme prévu, la mobilité des utilisateurs améliore la capacité, c'est-à-dire le débit obtenu par un utilisateur lorsqu'il est seul dans la cellule, soit environ 21 Mbit/s pour les utilisateurs de type 1 et 23 Mbit/s pour les utilisateurs de type 2. La mobilité améliore également le débit des utilisateurs (les utilisateurs de type 2 ont un meilleur débit que les utilisateurs de type 1) et la région de stabilité $\Lambda < 0,15$ pour le système avec uniquement des utilisateurs statiques et $\Lambda < 0,27$ lorsqu'ils sont mobiles. Dans ce dernier cas, on observe que la condition de stabilité ne dépend pas de la vitesse de l'utilisateur. Ces observations sur l'impact bénéfique de la mobilité rejoignent naturellement celles déjà présentées dans le chapitre 5 où une seule classe d'utilisateurs est considérée.

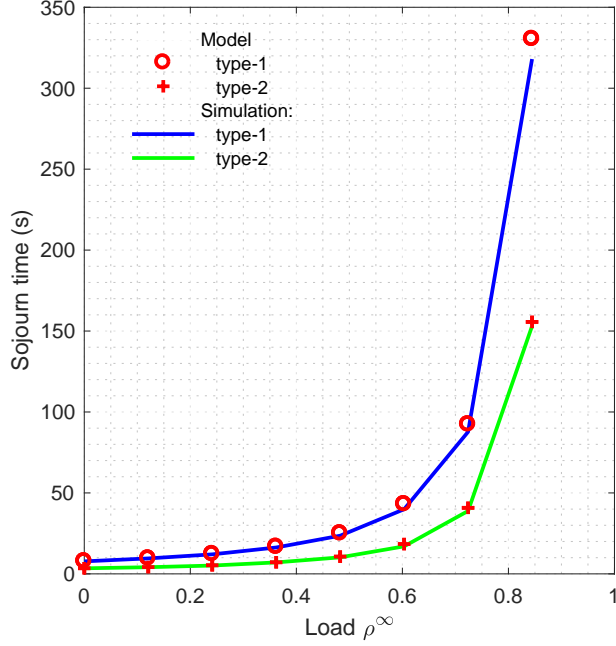


FIGURE 6.5 – Temps de séjour des utilisateurs de chaque type dans la cellule en fonction de la charge de la cellule.

6.5.2 Performance des utilisateurs dans le réseau

Nous présentons maintenant quelques résultats numériques pour les performances des utilisateurs de bout en bout dans le réseau. Nous considérons les 3 macrocellules présentées dans la section 6.5.

Sans hypothèses supplémentaires sur la mobilité physique des utilisateurs, nous supposons que lorsqu'un utilisateur actif quitte une cellule sans avoir terminé le téléchargement, il a la même probabilité d'aller dans chacune des $N - 1$ cellules voisines. Donc, $\Psi_{m \rightarrow n} = \frac{1}{N-1}$, c'est-à-dire $\Psi_{m \rightarrow n} = \frac{1}{2}$, $m, n \in \{1, 2, 3\}$.

La figure 6.6 montre le débit obtenu par les utilisateurs de chaque type dans le réseau en fonction du taux d'arrivée total $\lambda = \sum_{n=1}^N \Lambda_n$ de nouvelles demandes de connexion dans le réseau. L'erreur relative moyenne entre les résultats du modèle et ceux de la simulation est de 8,5%.

On note que le débit obtenu par les deux types d'utilisateurs est supérieur au débit obtenu dans la section 6.5.1 où seul la mobilité intracellulaire était considérée. Ceci montre l'impact de l'hétérogénéité des cellules (les cellules 2 et 3 ont de meilleures conditions de canal que la cellule 1). En effet, lorsque le réseau n'est pas très chargé, $\lambda < 0,8$, les utilisateurs dans les cellules 2 et 3 obtiennent un meilleur débit en raison de la capacité des zones. Ils ont également de meilleures chances de terminer leurs

transferts avant de changer de zone ou de faire un *handover* comme le montrent la figure 6.7 où la probabilité de *handover* reste inférieure à 0,5 et la figure 6.8 où le nombre de cellules visitées par un utilisateur actif est inférieur à 2. Par conséquent, dans ces deux cellules (cellules 2 et 3), le gain dû à la mobilité intracellulaire n'est plus significatif puisque très peu d'utilisateurs en moyenne changent de zone au cours de leur transfert. Notez également que la différence de débit entre les deux types d'utilisateurs est inférieure à la différence de débit avec uniquement la mobilité intracellulaire. Ceci est dû au fait qu'après un *handover*, les utilisateurs se retrouvent sur la zone périphérique de la nouvelle cellule, qui est la zone avec la moins bonne capacité alors que dans le cas de la cellule isolée, les utilisateurs au bord se déplacent toujours vers une zone de meilleure capacité. Comme le montrent la figure 6.7 (où la probabilité de changer de cellule au cours du service est plus importante pour les utilisateurs de type 2 que ceux de type 1) et la figure 6.8 (où les utilisateurs de type 2 visitent plus de cellules que les utilisateurs de type 1), les utilisateurs de type 2 sont plus impactés par la mobilité intercellulaire. Par conséquent, le gain dû à la mobilité intracellulaire est atténué par la mobilité intercellulaire.

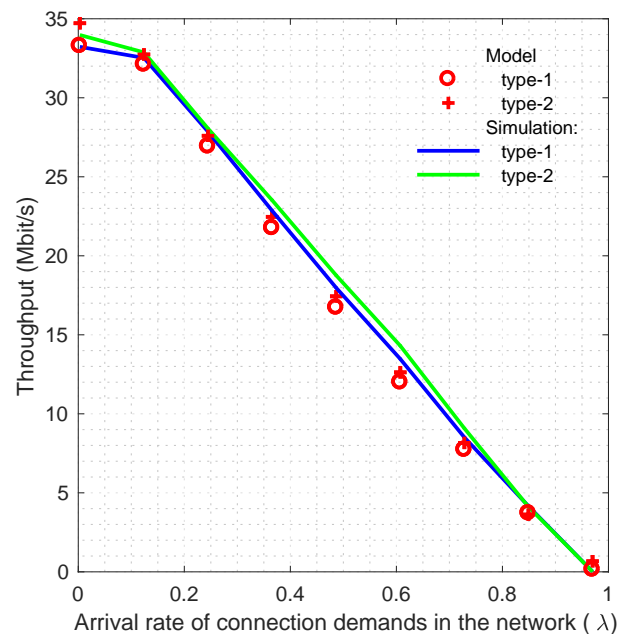


FIGURE 6.6 – Débits obtenus par les utilisateurs de chaque type dans le réseau en fonction du taux d'arrivée total de nouvelles demandes de connexion dans le réseau.

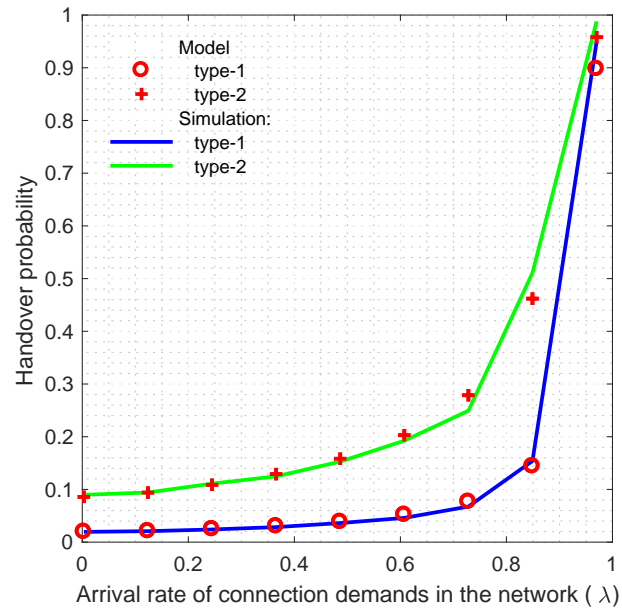


FIGURE 6.7 – Probabilité de *handover* de chaque type d'utilisateur dans le réseau en fonction du taux d'arrivée total de nouvelles demandes de connexion dans le réseau.

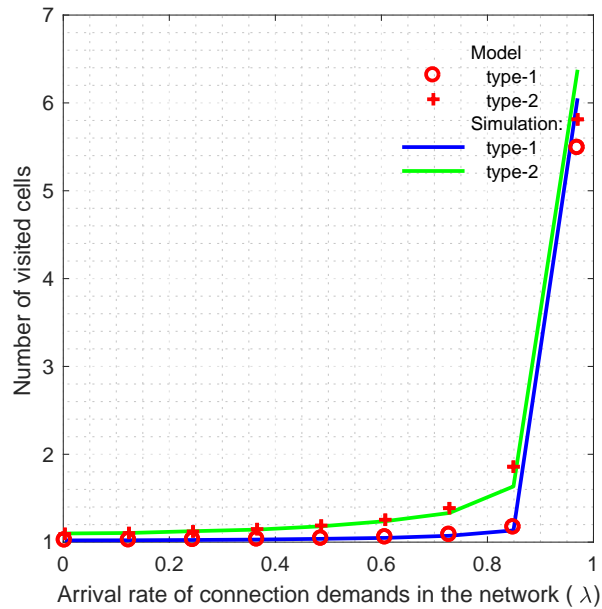


FIGURE 6.8 – Nombre moyen de cellules visitées par chaque type d'utilisateur dans le réseau en fonction du taux d'arrivée total de nouvelles demandes de connexion dans le réseau.

6.5.3 Impact de la distribution du temps de séjour dans une zone

Les figures 6.9 et 6.10 comparent le débit et la probabilité de *handover* des utilisateurs de type 2 dans le réseau en considérant différentes distributions du temps de séjour $\theta_{(j,n)}^k$. On peut voir sur ces courbes que le débit des utilisateurs est sensible à la distribution du temps de séjour dans chaque zone $\theta_{(j,n)}^k$.

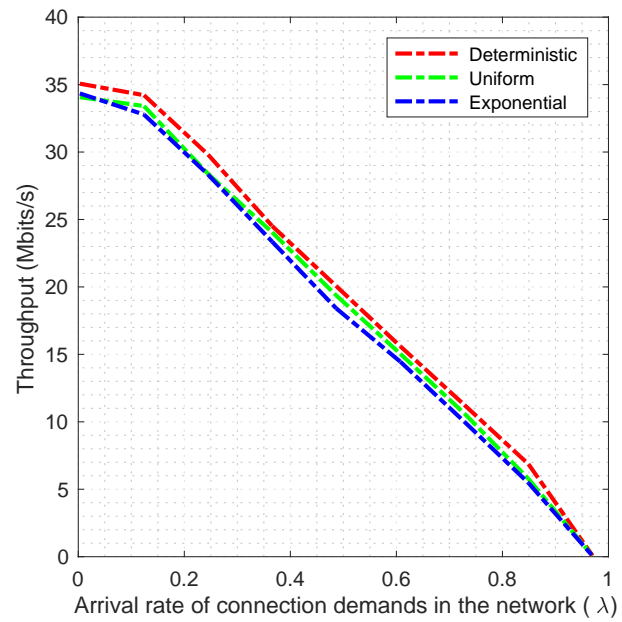


FIGURE 6.9 – Débits obtenu par les utilisateurs de type 2 dans le réseau en fonction du taux d'arrivée total de nouvelles demandes de connexion dans le réseau et la distribution du temps de séjour $\theta_{(j,n)}^k$.

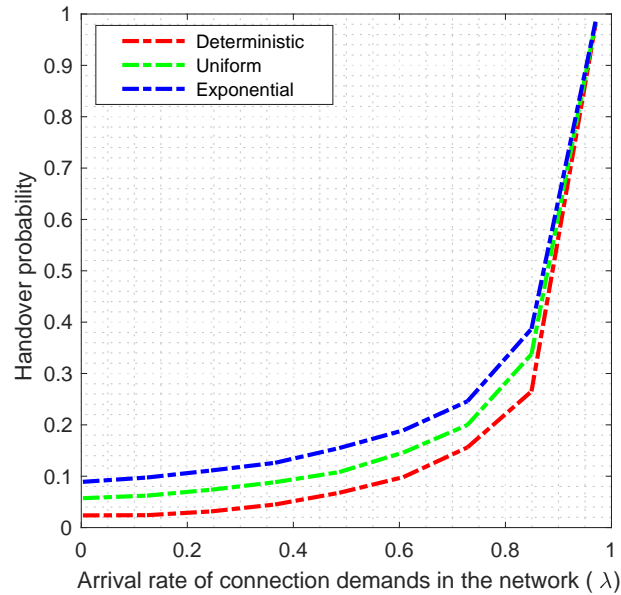


FIGURE 6.10 – Probabilité de *handover* des utilisateurs de type 2 dans le réseau en fonction du taux d’arrivée total de nouvelles demandes de connexion dans le réseau et la distribution du temps de séjour $\theta_{(j,n)}^k$.

6.5.4 Impact de la distribution du volume de données

Les figures 6.11 et 6.12 comparent le débit et la probabilité de *handover* des utilisateurs de type 2 dans le réseau en considérant différentes distributions du volume de données Σ^k à transférer par chaque type d’utilisateur. On remarque que le débit des utilisateurs est quasiment insensible à la distribution du volume de données, ce qui n’est pas sans nous rappeler la propriété d’insensibilité des files d’attente PS aux distributions de données. Il pourrait donc être intéressant de voir si nos modèles qui sont basés sur les files d’attente PS sans être des files PS classiques, conservent cette propriété d’insensibilité.

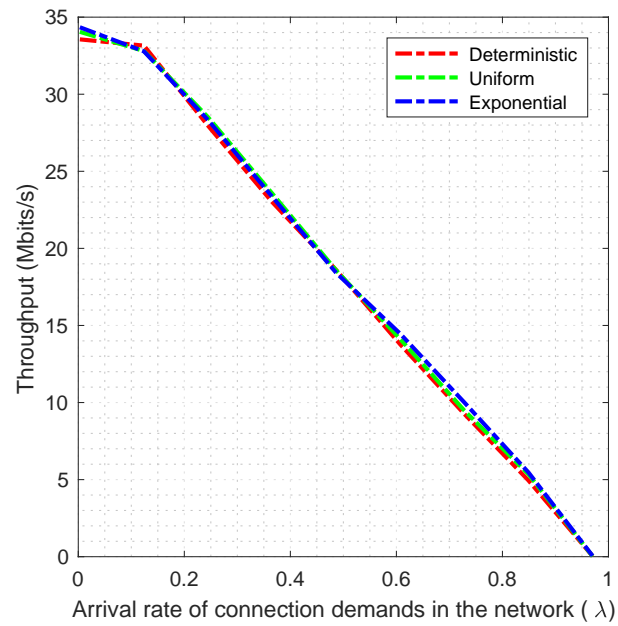


FIGURE 6.11 – Débits obtenu par les utilisateurs de type 2 dans le réseau en fonction du taux d'arrivée total de nouvelles demandes de connexion dans le réseau et la distribution du volume de donnée à transférer Σ^k .

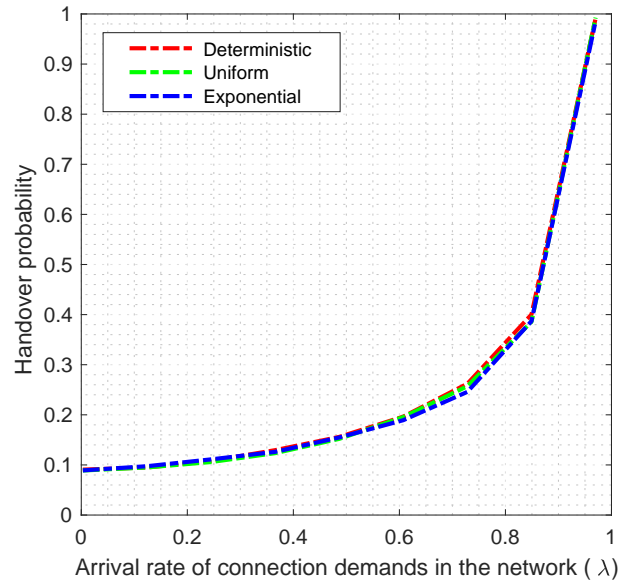


FIGURE 6.12 – Probabilité de *handover* des utilisateurs de type 2 dans le réseau en fonction du taux d’arrivée total de nouvelles demandes de connexion dans le réseau et la distribution du volume de donnée à transférer Σ^k .

6.6 Exemples d’utilisation des modèles

Nous présentons finalement un exemple d’utilisation de nos modèles analytiques pour répondre aux problèmes d’étude de performance. Dans cette optique, nous nous intéressons à trois exemples de problèmes portant sur le dimensionnement et sur le taux d’utilisation de chaque MCS dans un réseau écoulant le trafic de différents types d’utilisateurs. Tout d’abord, nous commençons par détailler ces exemples. Nous expliquons ensuite comment ils peuvent être simplement résolus grâce à nos modèles analytiques.

6.6.1 Problèmes : dimensionnement

Nous nous proposons de dimensionner le nombre d’utilisateurs d’un réseau afin de satisfaire une certaine qualité de service. Les caractéristiques du réseau et des utilisateurs sont les mêmes que celles décrites à la section 6.5. C’est-à-dire que nous considérons le réseau à 3 cellules précédent, et nous supposons que les utilisateurs dans le réseau sont répartis en proportion $\frac{3}{5}$ et $\frac{2}{5}$ entre les deux profils d’utilisateurs précédemment décrits dans ce chapitre. Rien n’empêche bien sûr de supposer davantage de profils d’utilisateurs. Afin de connaître le nombre d’utilisateurs pouvant être servis simultanément et convenablement dans le réseau, nous avons défini deux problèmes. Le premier problème concerne le débit moyen $\bar{\gamma}^k$ obtenu par les utilisateurs de chaque type dans

le réseau. Comme nous l'avons vu dans la section 6.5.2, les utilisateurs de type 1 sont les premiers à souffrir du manque de ressource disponible. De ce fait, garantir un débit minimum aux connexions des utilisateurs de type 1 revient également à garantir que les connexions des utilisateurs de type 2 obtiendront au moins ce minimum. Nous posons donc le problème suivant.

Problème 1 : Quel est le nombre maximum $\bar{N}_{n_{max1}}$ d'utilisateurs pouvant être servis simultanément dans chaque cellule du réseau tout en garantissant un débit de bout en bout $\bar{\Gamma}_{min}$ égal à 1 Mbits/s à chaque utilisateur présent dans le réseau ?

Le second critère concerne le taux moyen de *handover* dans le réseau. En effet, si la mobilité des utilisateurs permet d'améliorer les performances, notamment le débit, elle implique aussi la possibilité de *handover* qui est une procédure coûteuse en ressources.

Problème 2 : Quel est le nombre maximum $\bar{N}_{n_{max2}}$ d'utilisateurs pouvant être servis simultanément dans chaque cellule du réseau tout en garantissant un taux de *handover* maximum H_{max} inférieur à 0,5 pour chaque type d'utilisateur ? Dans ce deuxième problème, les utilisateurs de type 2 sont les premiers impactés puisqu'ils ont en moyenne un taux de *handover* plus élevé. De ce fait, garantir un taux de *handover* maximum H_{max} aux connexions des utilisateurs de type 2 revient également à garantir que les connexions des utilisateurs de type 1 auront un taux de *handover* inférieur à H_{max} .

6.6.2 Problème : efficacité d'utilisation de la ressource radio

Le troisième problème porte sur le taux d'utilisation de la ressource radio dans le réseau.

Problème 3 : Quel est le taux ϕ_{mcs_i} d'utilisation du MCS i dans le réseau ? Répondre à cette question permet de déterminer l'efficacité d'utilisation de la ressource radio dans le réseau. En effet, chaque MCS se compose d'un codage et d'une modulation. À chaque codage correspond une proportion de données utiles. Par exemple, le codage 64QAM 3/4 indique un taux de données utiles égale à 3/4 des données transmises.

6.6.3 Solution : problème de dimensionnement

Cellule isolée

Avant de présenter les solutions des trois problèmes précédents, intéressons nous d'abord à ce qui se passe dans une cellule. Pour ce faire, nous considérons les 4 cellules présentées dans le tableau 6.2, chacune prise dans un contexte de cellule isolée. Nous nous intéressons au nombre maximum d'utilisateurs qui peuvent être servis simultanément dans la cellule tout en garantissant un débit minimum de 1 Mbits/s à tout utilisateur présent dans cette cellule. Les cellules 2, 3 et 4 du tableau 6.2 sont les mêmes que celles du tableau 6.1, nous avons juste ajouté la cellule 1 qui dispose de 5 zones de codages.

La figure 6.13 illustre l'évolution du nombre d'utilisateurs dans la cellule en fonction du taux d'arrivée Λ des utilisateurs. Les points rouges sur chaque courbe donnent le

TABLE 6.2 – Paramètres des cellules

Cellules	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5
Cellule 1 : Radius (m)	$R_1 = 100$	$R_2 = 150$	$R_3 = 200$	$R_4 = 250$	$R_5 = 300$
Capacité (Mbits/s)	$C_1 = 75$	$C_2 = 51$	$C_3 = 31$	$C_4 = 10$	$C_5 = 6$
Cellule 2 : Radius (m)	$R_1 = 100$	$R_2 = 150$	$R_3 = 200$	$R_4 = 250$	
Capacité (Mbits/s)	$C_1 = 75$	$C_2 = 51$	$C_3 = 31$	$C_4 = 10$	
Cellule 3 : Radius	$R_1 = 100$	$R_2 = 150$	$R_3 = 200$		
Capacité (Mbits/s)	$C_1 = 75$	$C_2 = 51$	$C_3 = 31$		
Cellule 4 : Radius (m)	$R_1 = 100$	$R_2 = 150$			
Capacité (Mbits/s)	$C_1 = 75$	$C_2 = 51$			

nombre maximum d'utilisateurs pouvant être servis tout en garantissant un débit moyen de 1 Mbits/s à ces utilisateurs. Ce nombre est naturellement fonction de la qualité de transmission et donc des zones de transmission de la cellule. Par exemple, sur la figure 6.13, on peut voir que dans la cellule 1 qui dispose de plus de zones avec de moins bonnes conditions de transmission, le seuil de 1 Mbits/s est atteint lorsqu'il y a 18 utilisateurs actifs dans cette cellule, alors que pour les autres cellules ce seuil est atteint lorsqu'il y a 30 (respectivement 45 et 68) utilisateurs actifs dans la cellule 2 (respectivement 3 et 4).

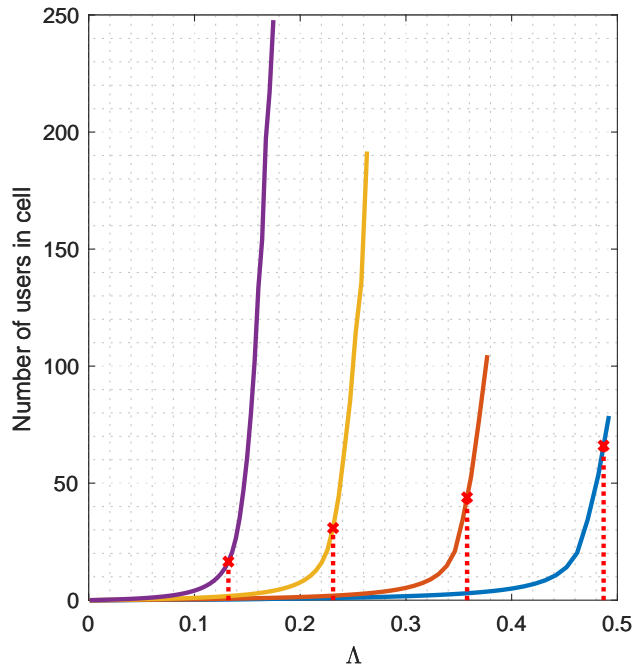


FIGURE 6.13 – Évolution du nombre moyen d'utilisateurs dans une cellule isolée en fonction du taux d'arrivée des utilisateurs dans les différentes cellules.

Réseau

Pour répondre aux deux problèmes posés, nous considérons le réseau à 3 cellules précédent et nous proposons de suivre un algorithme itératif très simple. Le principe de cet algorithme est de résoudre le modèle réseau hétérogène en augmentant successivement le taux d'arrivée des utilisateurs dans le réseau, ceci jusqu'à ce que le critère de dimensionnement considéré ne soit plus satisfait. Nous obtenons alors le nombre maximum ou minimum des utilisateurs pouvant être servis dans le réseau étudié tout en garantissant le critère choisi.

Algorithme

Début

Entrées : ensemble des paramètres de la section 6.5.

$\epsilon \Leftarrow 10^{-5}$

$\bar{\Gamma}_{seuil}^1 \Leftarrow 1 \text{Mbits/s}$

pour toute cellule du réseau **faire**

$\Lambda_{n_{max}} \Leftarrow \frac{C_n^\infty}{\sum_1^K q^k \Sigma^k}$: le taux d'arrivée maximal que peut supporter la cellule n

$\Lambda_{n_{min}} \Leftarrow 0$

fin pour

tant que $(\Lambda_{n_{max}} - \Lambda_{n_{min}}) > \epsilon$ **faire**

pour toute cellule du réseau **faire**

$\Lambda_n \Leftarrow \frac{(\Lambda_{n_{max}} + \Lambda_{n_{min}})}{2}$

fin pour

Résoudre le modèle réseau cellules hétérogènes.

Calculer les résultats de performance.

si $\bar{\Gamma}^1 > \bar{\Gamma}_{seuil}^1$ **alors** : *condition₁*

pour toute cellule du réseau **faire**

$\Lambda_{n_{min}} \Leftarrow \Lambda_n$

fin pour

fin si

si $\bar{\Gamma}^1 < \bar{\Gamma}_{seuil}^1$ **alors** : *condition₂*

pour toute cellule du réseau **faire**

$\Lambda_{n_{max}} \Leftarrow \Lambda_n$

fin pour

fin si

fin tant que

Sortie :

pour toute les cellules du réseau **faire**

$\bar{N}_{n_{max1}} \Leftarrow \sum_1^K Q_n^k$ avec Q_n^k calculé comme à l'équation 6.21.

fin pour

$\bar{N}_{max1} \Leftarrow \sum_1^N \bar{N}_{n_{max1}}$: nombre total d'utilisateurs dans le réseau.

Fin

L'utilisation de cet algorithme nous permet d'obtenir la solution de notre problème 1. Il est à remarquer que dans cet algorithme, le critère de dimensionnement utilisé est le débit obtenu par un utilisateur de type 1 dans le réseau, car cet algorithme répond au problème 1. Nous trouvons ainsi que le réseau peut servir simultanément au plus 122 utilisateurs environ, soit une répartition de $\bar{N}_{1_{max1}} = 62$ dans la cellule 1, $\bar{N}_{2_{max1}} = 37$ dans la cellule 2 et $\bar{N}_{3_{max1}} = 23$ dans la cellule 3, tout en garantissant un débit $\bar{\Gamma}_{min} = 1$ Mbits/s à tous les utilisateurs dans le réseau.

Notre algorithme permet également (moyennant quelques ajustements) de résoudre le second problème qui consiste à déterminer le nombre maximum $\bar{N}_{n_{max2}}$ d'utilisateurs pouvant être servis simultanément dans chaque cellule tout en garantissant une probabilité de *handover* inférieure à $H_{max} = 0,5$. Pour ce faire, il est nécessaire de changer le critère de dimensionnement, qui portera désormais sur la probabilité de *handover* des utilisateurs de type 2. Il faut donc remplacer dans l'algorithme $\bar{\Gamma}^1$ par H^2 , $\bar{\Gamma}_{seuil}^1$

par $H_{seuil} = 0,5$ et intervertir les conditions une et deux. Nous trouvons alors que $\bar{N}_{n_{max2}} = 40$ environ avec une répartition de $\bar{N}_{1_{max2}} = 23$ utilisateurs dans la cellule 1, $\bar{N}_{2_{max2}} = 10$ utilisateurs dans la cellule 2 et $\bar{N}_{3_{max1}} = 7$ utilisateurs dans la cellule 3.

La figure 6.14 montre l'évolution du nombre d'utilisateurs dans chacune des 3 cellules du réseau en fonction du taux d'arrivée global des utilisateurs dans le réseau. On peut voir sur ces courbes en points rouges (respectivement en points bleus), le nombre d'utilisateurs dans chacune des cellules lorsque le débit Γ^1 des utilisateurs de type 1 est égal à 1 Mbits/s (respectivement lorsque la probabilité de *handover* H^2 des utilisateurs de type 2 est égale à 0,5).

On observe que, quel que soit le critère de performance, le nombre moyen $\bar{N}_{n_{max}}$ d'utilisateurs actifs dans la cellule dépend naturellement du nombre de zones de la cellule et des capacités de transmission de ces zones. En effet, le nombre d'utilisateurs présents est toujours plus élevé dans la cellule 1 (qui dispose de 4 zones) que dans les cellules 2 et 3 qui disposent de trois et deux zones respectivement.

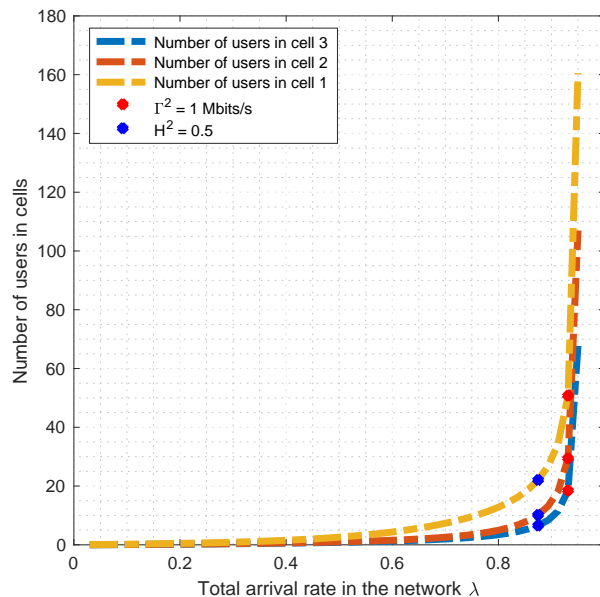


FIGURE 6.14 – Évolution du nombre d'utilisateurs dans chaque cellule du réseau en fonction du taux d'arrivée global des utilisateurs dans le réseau.

6.6.4 Solution : efficacité d'utilisation de la ressource radio

La figure 6.15 présente la proportion moyenne d'utilisation des 4 MCS (correspondant aux 4 zones) dans le réseau. Cette répartition est la répartition moyenne par

rapport à la charge de la cellule. Cependant, précisons que ce résultat est représentatif de ceux obtenus dans les nombreuses configurations que nous avons dévisagées.

Le taux d'utilisation d'un MCS est calculé comme étant la proportion d'utilisateurs présents dans la zone correspondant à ce MCS dans tous les cellules du réseau :

$$\phi_{mcs_i} = \frac{\sum_{n=1}^N Q_{j,n}}{\sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^{J_n} Q_{j,n}}, \quad (6.30)$$

avec $Q_{j,n} = \sum_{k=1}^K Q_{j,n}^k$.

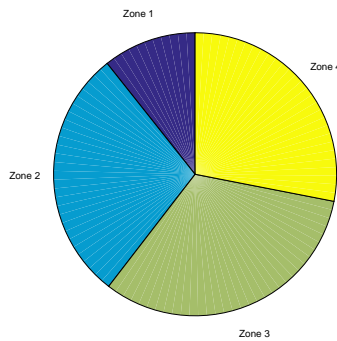


FIGURE 6.15 – Proportion d'utilisation des 4 MCS dans le réseau.

Les proportions d'utilisation des 4 MCS dans le réseau sont donc : 11% pour le MCS 1, 29% pour le MCS 2, 32% pour le MCS 3 et 28% pour le MCS 4.

6.7 Synthèse

Au cours de ce chapitre, nous avons vu comment intégrer la diversité des profils des utilisateurs à nos modèles monocellulaires. Ce chapitre a également présenté notre modèle pour les réseaux hétérogènes qui tient compte non seulement de la diversité

des profils utilisateurs mais aussi de l'hétérogénéité des cellules dans les réseaux. Les expressions des paramètres de performance restent simples malgré l'intégration de cette diversité des profils utilisateurs.

Cellule isolée

Nous nous sommes tout d'abord focalisés sur la mobilité intracellulaire. Un modèle a alors été proposé afin d'obtenir les performances des différents types d'utilisateurs dans la cellule fermée. Nous avons montré que ce modèle reste cohérent avec les limites analytiques connues correspondant aux utilisateurs statiques ou aux utilisateurs à vitesse infinie, et fournit une très bonne précision pour des vitesses plus générales. Le modèle exploite la simplicité des files PS pour obtenir les performances des utilisateurs et de la cellule considérée. Ce modèle confirme également l'impact bénéfique de la mobilité des utilisateurs sur les performances de la cellule et des utilisateurs.

Réseau hétérogène

En nous inspirant du modèle monocellulaire nous avons conçu un modèle plus général prenant en compte la mobilité intercellulaire des utilisateurs, permettant ainsi d'obtenir les performances de bout en bout de ces utilisateurs. Le modèle est une simple chaîne de Markov à temps discret qui reproduit le routage des utilisateurs mobiles entre les différentes cellules du système. La simplicité de cette approche, alliée à la rapidité de résolution de nos modèles analytiques, rend ainsi possible de répondre aux problèmes d'évaluation de performance les plus complexes.

Conclusion

Tout au long de ces trois années de thèse, nous nous sommes attachés à concevoir des outils efficaces pouvant aider les opérateurs et toute autre personne à l'évaluation de performances dans les réseaux cellulaires de quatrième génération et à venir. Dans cette optique, nous avons proposé de nombreux modèles analytiques prenant en compte certaines spécificités sur lesquelles reposent ces réseaux, mais également le comportement des utilisateurs de ces réseaux, notamment leur mobilité. Tous nos modèles ont été développés afin de permettre d'évaluer instantanément les performances des cellules et des réseaux cellulaires transportant le trafic généré des applications générant du trafic élastique. Un accent particulier a été mis sur la simplicité et la facilité de résolution des modèles proposés ceci afin de garantir leur utilisation même pour des systèmes complexes et la possibilité de les étendre.

Signalons, par ailleurs, qu'une partie des travaux réalisés aux cours de cette thèse ont été menés dans le cadre du projet IDEFIX donc les principaux partenaires sont Nokia Bell Labs, Orange Lab, l'école Télécom ParisTech, les université d'Avignon, paris-sud et Sorbonne université.

Contributions

Le premier chapitre de cette thèse nous a permis de faire une brève présentation des principales technologies mises en œuvre dans les réseaux cellulaires de nouvelles générations. Nous avons notamment observé que le mécanisme de découpage de la ressource radio à la fois dans le domaine fréquentiel et dans le domaine temporel se base sur la technique de multiplexage OFDM. La technique d'accès multiple OFDMA est ensuite utilisée pour gérer l'accès concurrent à ces unités de ressources. Nous avons également pu constater que les réseaux cellulaires actuels et à venir reposent sur l'utilisation de large bandes de fréquences conduisant à de fortes variations de la qualité du canal radio et donc des MCS utilisés par les utilisateurs lors d'une transmission de données. Ce chapitre a également permis de définir les bases sur lesquelles se fonde l'ensemble des modèles analytiques élaborés au cours de cette thèse. Une description du système modélisé a été présentée, suivie de la présentation des différentes hypothèses sur lesquelles nos modèles reposent. Chacune des hypothèses de modélisation concernant le système, le canal radio ou encore le trafic a alors été discutée afin d'en justifier la pertinence.

Le deuxième chapitre de cette thèse a été consacré à une brève présentation des files d'attente. Nous nous sommes particulièrement intéressés aux files *Processor Sharing*

(PS) qui sont à la base des modèles développés au cours de cette thèse. Au travers d'un exemple simple, nous avons présenté quelques résultats importants des files PS. Cet exemple a également permis de voir l'insensibilité des files PS à la distribution des tailles des requêtes.

Le troisième chapitre de cette thèse a proposé un état de l'art fourni des travaux menés afin d'évaluer les performances des réseaux cellulaires. Cet état de l'art a été également l'occasion de justifier notre volonté de nous tourner vers l'élaboration des modèles analytiques dans le but d'évaluer les performances des réseaux cellulaires transportant du trafic élastique. De plus, les travaux présentés dans ce chapitre ont permis de tirer des enseignements utiles. Nous nous sommes ainsi rendu compte que l'utilisation de files PS permet, dans certains cas, de ne pas avoir à s'inquiéter des distributions des variables aléatoires caractérisant le trafic. D'autres travaux encore nous ont poussé à orienter notre évaluation de performance du point de vue de l'utilisateur. Autrement dit à nous intéresser uniquement au niveau *flow* et à oublier volontairement certains phénomènes agissant au niveau paquet, qui sont certes non dépourvus d'intérêt, mais sont insignifiants du point de vue de l'utilisateur. Enfin, nous avons également pu établir l'importance de prendre en compte la mobilité des utilisateurs et les changements fréquents de leur MCS dans les modèles tout en limitant la complexité engendrée.

Le quatrième chapitre de cette thèse a été consacré à nos modèles pour des petites cellules à capacité constante. Ces modèles permettent d'évaluer les performances des utilisateurs statiques dans une petite cellule abritant des utilisateurs statiques et mobiles. Le premier modèle proposé est une chaîne de Markov qui en plus d'être une représentation simple et intuitive de l'occupation de la cellule, à l'avantage d'être un modèle exact. Le second modèle est basé sur les files PS et permet donc d'exploiter les propriétés de ces files pour en déduire les paramètres de performance des utilisateurs statiques tels que le débit moyen ou encore le temps de séjour, mais également la probabilité de *handover* des utilisateurs mobiles.

Le cinquième chapitre de cette thèse a été dédié à nos modèles pour les macrocellules à capacité variable sur la zone de couverture. Dans un premier temps, nous avons présenté le modèle pour une cellule ouverte dans laquelle les utilisateurs pouvaient sortir de la cellule au cours de leur téléchargement. Nous avons ensuite étendu le modèle à un réseau homogène de macrocellules statistiquement identiques. Nous avons montré que les résultats de ce modèle sont conformes aux bornes analytiques connues correspondant aux utilisateurs statiques et des utilisateurs mobiles avec une vitesse infinie. Le modèle permet d'obtenir les performances avec une très bonne précision dans le cas des vitesses réalistes. Les nombreux résultats de ce modèle confirment l'impact positif de la mobilité des utilisateurs sur les performances des utilisateurs et de la cellule. Le modèle permet également d'obtenir les performances de bout en bout des utilisateurs dans un réseau de cellules statistiquement équivalentes. Cela a permis de montrer que le gain de performance dû à la mobilité n'est pas une fonction monotone de la vitesse des utilisateurs.

Le sixième chapitre de cette thèse a été dédié aux réseaux hétérogènes prenant en compte la diversité des profils des utilisateurs. Nous avons proposé un modèle afin

d'obtenir les performances des différents profils d'utilisateurs dans une cellule fermée où les utilisateurs ne peuvent ni la quitter ni y arriver du fait de leur mobilité. Nous avons montré que ce modèle reste cohérent avec les bornes analytiques connues énoncées précédemment et fournit les performances avec une très bonne précision pour des vitesses plus générales. Le modèle exploite la simplicité des files PS pour obtenir les performances des utilisateurs et de la cellule considérée. Ce modèle confirme également l'impact bénéfique de la mobilité des utilisateurs sur les performances des utilisateurs de la cellule. Nous avons ensuite étendu ce modèle monocellulaire en proposant un modèle plus général prenant en compte la mobilité intercellulaire des utilisateurs dans un réseau hétérogène de cellules. Le modèle est une simple chaîne de Markov à temps discret associée aux files PS multiclass (une pour chaque cellule du réseau) qui reproduit le routage des utilisateurs entre les différentes cellules du système. La simplicité de cette approche, alliée à la rapidité de résolution de nos modèles analytiques, rend ainsi possible de répondre aux problèmes d'évaluation de performance les plus complexes dans ces réseaux.

Pour finir, soulignons que les travaux menés durant ces trois années de thèse ont fait l'objet de plusieurs publications dans des conférences internationales [7, 4, 84, 6, 3] et nationales [5]. Ajoutons que deux articles sont actuellement en cours de soumission dans des revues internationales.

Perspectives

Si les travaux présentés dans cette thèse apportent des réponses aux besoins des équipementiers et opérateurs désireux de mieux évaluer les performances des réseaux cellulaires en prenant en compte la mobilité des utilisateurs, il reste tout de même des pistes à explorer sur le sujet. Voici quelques-unes de celles qui nous tiennent le plus à cœur.

En premier lieu, une piste très intéressante serait de faire une validation plus poussée de nos modèles analytiques au moyen de comparaisons avec des traces de trafic. Ce type de validation, est souvent riche en enseignements et nous permettrait d'évaluer bien plus finement la précision des modèles proposés.

En deuxième lieu, une autre piste importante serait d'étendre nos modèles afin de pouvoir considérer désormais des distributions autre que la distribution exponentielle pour le volume de données à transférer. Bien sûr, il s'agirait à nouveau de concevoir des modèles faciles à résoudre permettant d'aboutir à des expressions simples de l'ensemble des paramètres de performances malgré la complexification du système. De plus, nous pourrions réfléchir à la manière de prendre en compte explicitement le trafic temps réel et les mécanismes de contrôle d'accès dans notre modélisation, tout en conservant notre objectif de simplicité de résolution.

En troisième lieu, une autre piste serait d'étudier la possibilité d'adapter nos modèles à davantage de politiques d'allocation afin de pouvoir mesurer les avantages et les inconvénients de ces politiques. Bien que cela soit assez difficile à modéliser, nous pourrions essayer, par exemple, de développer un modèle considérant les politiques

Proportional Fair (PF) qui servent chaque utilisateur de la cellule en fonction de ses conditions radio et/ou de la quantité de ressources déjà reçues.

En dernier lieu, une piste particulièrement intéressante serait de réfléchir à de nouvelles méthodes d'évaluation de performances des réseaux à venir permettant à un système comme la 5G d'évaluer continuellement et en temps réel la QOS (*Quality Of service*) et la QOE (*Quality Of user Experience*) et faire des ajustements dans le réseau si nécessaire. Bien sûr il faudrait penser à l'évaluation de performance (à travers la QOS et la QOE) dès l'étape de la conception de l'architecture du système en y intégrant un module d'évaluation de performances. Ce module devra communiquer avec d'autres modules du système afin d'acquérir des informations sur la qualité du service fourni mais également pour donner des recommandations sur les ajustements à faire dans le réseau. Cette communication pourrait être facilitée avec la virtualisation des services réseau comme le préconise les C-RAN (*Cloud Radio Access Network*) qui est une technologie sérieusement envisagée pour la 5G. Nous pourrions également tirer avantage des progrès opérés en *Deep Learning* ces dernières années pour doter ce module d'évaluation de performances de capacité d'auto-apprentissage lui permettant ainsi de s'adapter aux changements pouvant survenir dans le réseau.

Annexe A

Dans cet algorithme, les indices i et j des variables font référence aux zones de la cellule. L'indices p signifie précédent et sont utilisé pour indiquer la valeur d'une variable à l'étape précédente de l'exécution de l'algorithme, et l'indice pp indique la valeur deux étapes en arrière.

Algorithme-point-fixe_A

Début :

Entrées :

$$\mathbb{E}(\Sigma), C_j, \Lambda_j, \mathbb{E}(\Theta_j), P_{ji}, \epsilon$$

Initialisation :

$$\bar{x}_j \leftarrow \mathbb{E}(\Sigma)$$

$$h_j \leftarrow 0$$

$$\Lambda_{ij} \leftarrow 0$$

$$\lambda_j \leftarrow \Lambda_j$$

$$\rho_j \leftarrow 0$$

$$\alpha \leftarrow 1$$

Répéter :

// Mettre à jour les valeurs précédentes de quelques variables

$$\bar{x}_{j_p} \leftarrow \bar{x}_j$$

$$h_{j_p} \leftarrow h_j$$

$$\rho_{pp} \leftarrow \rho_p$$

$$\rho_p \leftarrow \rho$$

//Calcul des taux de passage entre zones

$$\Lambda - ij \Leftarrow \lambda h_j P_{ji}$$

//Calcul du taux d'arrivée totale dans chaque zone

$$\lambda_j \Leftarrow \Lambda_j + \Lambda_{ji}$$

//Calcul de la charge de la cellule

$$\rho_j \Leftarrow \frac{\lambda_j \bar{x}_j}{C_j}$$

$$\rho \Leftarrow \sum_{j=1}^J \rho_j$$

//Ajustement sur la charge de la cellule si elle est inférieure à 0 ou supérieure à 1

Si $\rho \leq 0$

$$\rho \Leftarrow \frac{\rho_p}{2}$$

Si $\rho \geq 1$

$$\rho \Leftarrow \frac{(1+\rho_p)}{2}$$

//Ajustement sur la charge de la cellule si elle ne converge pas

$$\rho \Leftarrow \alpha \rho + (1 - \alpha) \rho_p$$

Si $|\rho - \rho_p| > |\rho_p - \rho_{pp}|$

// L'ajustement ne se fait pas plus de deux fois pour éviter une fausse convergence

Si $\alpha > \frac{1}{4}$

$$\alpha \Leftarrow \frac{\alpha}{2}$$

//Calcul du débit, de la quantité de données téléchargées et de la probabilité de *handover* entre zones

$$\bar{\gamma} \Leftarrow C(1 - \rho)$$

$$\bar{x}_j \Leftarrow \frac{\mathbb{E}(\Sigma)\mathbb{E}(\Theta_j)\bar{\gamma}_j}{\mathbb{E}(\Sigma)+\mathbb{E}(\Theta_j)\bar{\gamma}_j}$$

$$h_j \Leftarrow \frac{\mathbb{E}(\Sigma)}{\mathbb{E}(\Sigma)+\mathbb{E}(\Theta_j)\bar{\gamma}_j}$$

Tant que $|\frac{\bar{x}_j - \bar{x}_{jp}}{\bar{x}_j}| < \epsilon$ ou $|\frac{h_j - h_{jp}}{h_j}| < \epsilon$

Sorties : \bar{x}_j, h_j

Fin :

Annexe B

Dans cet algorithme, les indices i et j des variables font référence aux zones de la cellule. k en exposant désigne le type de l'utilisateur. L'indice p signifie précédent et est utilisé pour indiquer une valeur de l'étape précédente de l'exécution de l'algorithme, et l'indice pp pour indiquer une valeur deux étapes en arrière.

Algorithme-point-fixe_B

Début :

Entrées :

$$\mathbb{E}(\Sigma^k), C_{j,n}, \Lambda_{j,n}^k, \mathbb{E}(\Theta_{j,n}^k), P_{j \rightarrow i,n}, \Psi_{m \rightarrow n}, \epsilon$$

Initialisation :

$$\begin{aligned}\bar{x}_{j,n}^k &\leftarrow \mathbb{E}(\Sigma^k) \\ h_{j,n}^k &\leftarrow 0 \\ \lambda_{j,n}^k &\leftarrow \Lambda_{j,n}^k \\ \Lambda_{i \rightarrow j,n}^k &\leftarrow 0 \\ \nu_{m \rightarrow n}^k &\leftarrow 0 \\ \rho_n &\leftarrow 0 \\ \alpha_n &\leftarrow 1\end{aligned}$$

Répéter :

$$\begin{aligned}// \text{ Mettre à jour les valeurs précédentes de quelques variables} \\ \bar{x}_{j_p,n}^k &\leftarrow \bar{x}_{j,n}^k \\ h_{j_p,n}^k &\leftarrow h_{j,n}^k \\ \nu_{m \rightarrow n_p}^k &\leftarrow \nu_{m \rightarrow n}^k \\ \rho_{n_{pp}} &\leftarrow \rho_{n_p} \\ \rho_{n_p} &\leftarrow \rho_n\end{aligned}$$

//Calcul des taux de passage entre les zones de la cellule n

$$\Lambda_{i \rightarrow j, n} \Leftarrow \lambda h_{j, n}^k P_{j \rightarrow i, n}$$

//Calcul du taux d'arrivée total dans chaque zone de la cellule n

Pour $j \neq J_n$

$$\lambda_{j, n}^k \Leftarrow \Lambda_{j, n}^k + \Lambda_{i \rightarrow j, n}^k$$

Pour $j = J_n$

$$\lambda_{j, n}^k \Leftarrow \Lambda_{j, n}^k + \Lambda_{j-1 \rightarrow j, n}^k + \sum_{m=1, m \neq n}^N \nu_{m \rightarrow n}^k$$

//Calcul de la charge de la cellule n

$$\rho_{j, n}^k \Leftarrow \frac{\lambda_{j, n}^k \bar{x}_{j, n}^k}{C_{j, n}}$$

$$\rho_n \Leftarrow \sum_{j=1}^{J_n} \sum_{k=1}^K \rho_{j, n}^k$$

//Ajustement sur la charge de la cellule n si elle est inférieure à 0 ou supérieure à 1

Si $\rho_n \leq 0$

$$\rho_n \Leftarrow \frac{\rho_{n_p}}{2}$$

Si $\rho_n \geq 1$

$$\rho_n \Leftarrow \frac{(1 + \rho_{n_p})}{2}$$

//Ajustement sur la charge de la cellule si elle ne converge pas

$$\rho_n \Leftarrow \alpha_n \rho_n + (1 - \alpha_n) \rho_{n_p}$$

Si $|\rho_n - \rho_{n_p}| > |\rho_{n_p} - \rho_{n_{pp}}|$

// L'ajustement ne se fait pas plus de deux fois pour éviter une fausse convergence

Si $\alpha_n > \frac{1}{4}$

$$\alpha_n \Leftarrow \frac{\alpha_n}{2}$$

Calcule du nombre moyen de chaque type d'utilisateur dans chaque zone de la cellule n

$$\bar{Q}_{j, n}^k \Leftarrow \frac{\rho_{j, n}^k}{1 - \rho_n}$$

// Calcul de la probabilité de *handover* de la cellule m

$$H_m^k \Leftarrow \frac{\bar{Q}_{J_m, n}^k \frac{P_{J_m \rightarrow 0, m}}{\mathbb{E}(\Theta_{J_m, m}^k)}}{\lambda_m^k}$$

//Calcul du taux de passage des utilisateurs de type k de la cellule m vers la cellule n

$$\nu_{m \rightarrow n}^k \Leftarrow \lambda_m^k H_m^k \Psi_{m \rightarrow n}$$

//Calcul du débit, de la quantité de données téléchargées et de la probabilité de *handover* dans chaque zone de la cellule n

$$\bar{\gamma}_{j, n} \Leftarrow C_{j, n} (1 - \rho_n)$$

$$\bar{x}_{j,n}^k \leftarrow \frac{\mathbb{E}(\Sigma)\mathbb{E}(\Theta_{j,n}^k)\bar{\gamma}_{j,n}}{\mathbb{E}(\Sigma)+\mathbb{E}(\Theta_{j,n}^k)\bar{\gamma}_{j,n}}$$

$$h_{j,n}^k \leftarrow \frac{\mathbb{E}(\Sigma)}{\mathbb{E}(\Sigma)+\mathbb{E}(\Theta_{j,n}^k)\bar{\gamma}_{j,n}}$$

Tant que $\left| \frac{\bar{x}_{j,n}^k - \bar{x}_{j,p,n}^k}{\bar{x}_{j,n}^k} \right| < \epsilon$ ou $\left| \frac{h_{j,n}^k - h_{j,p,n}^k}{h_{j,n}^k} \right| < \epsilon$ ou $\left| \frac{\nu_{m \rightarrow n}^k - \nu_{m \rightarrow n,p}^k}{\nu_{m \rightarrow n}^k} \right| < \epsilon$

Sorties : $\bar{x}_{j,n}^k, h_{j,n}^k, \nu_{m \rightarrow n}^k$

Fin :

Bibliographie

- [1] Erik Dahlman, Stefan Parkvall, Johan Skold, and Per Beming. *3G evolution : HSPA and LTE for mobile broadband*. Academic press, 2010.
- [2] OneLab. *Developing testbeds for the Future Internet* <https://onelab.eu/> *author=, year=, publisher=*.
- [3] Bruno Baynat, R-M Indre, Narcisse Nya, Philippe Olivier, and Alain Simonian. Impact of mobility in dense lte-a networks with small cells. In *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, pages 1–5. IEEE, 2015.
- [4] Bruno Baynat and Narcisse Nya. Performance model for 4g/5g networks taking into account intra-and inter-cell mobility of users. In *Local Computer Networks (LCN), 2016 IEEE 41st Conference on*, pages 212–215. IEEE, 2016.
- [5] Narcisse Nya and Bruno Baynat. Modèle ps multi-classe pour les performances des utilisateurs mobiles dans les réseaux lte. In *ALGOTEL 2016-18èmes Rencontres Francophones sur les Aspects Algorithmiques des Télécommunications*, 2016.
- [6] Narcisse Nya and Bruno Baynat. A ps queue model for lte macrocells taking into account mobility of users. In *Proceedings of the 2015 Workshop on Wireless of the Students, by the Students, & for the Students*, pages 44–46. ACM, 2015.
- [7] Narcisse Nya and Bruno Baynat. Performance model for 4g/5g heterogeneous networks with different classes of users. In *Proceedings of the 20th ACM International Conference on Modelling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, pages 171–178. ACM, 2017.
- [8] Richard G Lyons. *Understanding Digital Signal Processing, 3/E*. Pearson Education India, 2004.
- [9] Stephen G Wilson. *Digital modulation and coding*. Prentice-Hall, Inc., 1995.
- [10] Leonard Kleinrock. Time-shared systems : A theoretical treatment. *Journal of the ACM (JACM)*, 14(2) :242–261, 1967.
- [11] Leonard Kleinrock. Analysis of a time-shared processor. *Naval Research Logistics (NRL)*, 11(1) :59–73, 1964.
- [12] Gavin Yeung, Mineo Takai, Rajive Bagrodia, Alireza Mehrnia, and Babak Daneshrad. Detailed ofdm modeling in network simulation of mobile ad hoc networks. In *Proceedings of the eighteenth workshop on Parallel and distributed simulation*, pages 26–34. ACM, 2004.

- [13] J Colom Ikuno, Martin Wrulich, and Markus Rupp. Performance and modeling of lte h-arq. In *Proc. International ITG Workshop on Smart Antennas (WSA 2009), Berlin, Germany*, 2009.
- [14] Josep Colom Ikuno, Martin Wrulich, and Markus Rupp. System level simulation of lte networks. In *Vehicular Technology Conference (VTC 2010-Spring), 2010 IEEE 71st*, pages 1–5. IEEE, 2010.
- [15] Gerardo Gómez, David Morales-Jiménez, Juan J Sánchez-Sánchez, and J Tomás Entrambasaguas. A next generation wireless simulator based on mimo-ofdm : Lte case study. *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*, 2010 :15, 2010.
- [16] Christian Mehlführer, Martin Wrulich, Josep Colom Ikuno, Dagmar Bosanska, and Markus Rupp. Simulating the long term evolution physical layer. In *Signal Processing Conference, 2009 17th European*, pages 1471–1478. IEEE, 2009.
- [17] Timo Nihtilä, Vitaliy Tykhomyrov, Olli Alanen, Mikko A Uusitalo, Antti Sorri, Martti Moisio, Sassan Iraj, Rapeepat Ratasuk, and Nitin Mangalvedhe. System performance of lte and ieee 802.11 coexisting on a shared frequency band. In *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2013 IEEE*, pages 1038–1043. IEEE, 2013.
- [18] Rapeepat Ratasuk, Nitin Mangalvedhe, and Amitava Ghosh. Lte in unlicensed spectrum using licensed-assisted access. In *Globecom Workshops (GC Wkshps), 2014*, pages 746–751. IEEE, 2014.
- [19] Mohamed Kassab, Jean-Marie Bonnin, and Mohamed Mahdi. Wimax simulation module with management architecture and signaling exchanges. In *Proceedings of the Fourth International ICST Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools*, page 6. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering), 2009.
- [20] Simulx. the wireless network simulator. <http://simulx.u-strasbg.fr>.
- [21] Vandana Singh and Vinod Sharma. Efficient and fair scheduling of uplink and downlink in ieee 802.16 ofdma networks. In *Wireless Communications and Networking Conference, 2006. WCNC 2006. IEEE*, volume 2, pages 984–990. IEEE, 2006.
- [22] Teerawat Issariyakul and Ekram Hossain. *Introduction to network simulator NS2*. Springer Science & Business Media, 2011.
- [23] David Johnson, Charles Perkins, and Jari Arkko. Mobility support in ipv6. Technical report, 2004.
- [24] Alexander Sayenko, Olli Alanen, and Timo Hämäläinen. Scheduling solution for the ieee 802.16 base station. *Computer Networks*, 52(1) :96–115, 2008.
- [25] Fen Hou, Pin-Han Ho, and Xuemin Sherman Shen. An efficient scheduling scheme with diverse traffic demands in ieee 802.16 networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 10(7) :959–971, 2010.

- [26] Bilal Sadiq, Ritesh Madan, and Ashwin Sampath. Downlink scheduling for multi-class traffic in lte. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2009(1) :510617, 2009.
- [27] Averill M Law, W David Kelton, and W David Kelton. *Simulation modeling and analysis*, volume 2. McGraw-Hill New York, 1991.
- [28] Alexandre Proutière. *Insensibilité et bornes stochastiques dans les réseaux de files d'attente. Application à la modélisation des réseaux de télécommunication au niveau flot*. PhD thesis, Ecole Polytechnique X, 2003.
- [29] Sem Borst and Nidhi Hegde. Integration of streaming and elastic traffic in wireless networks. In *INFOCOM 2007. 26th IEEE International Conference on Computer Communications. IEEE*. IEEE, 2007.
- [30] Mariana Dirani, Chadi Tarhini, and Tijani Chahed. Cross-layer modeling of capacity in wireless networks : Application to umts/hsdpa, ieee802. 11 wlan and ieee802. 16 wimax. *Computer Communications*, 2007.
- [31] Remco Litjens and Richard J Boucherie. Elastic calls in an integrated services network : the greater the call size variability the better the qos. *Performance evaluation*, 2003.
- [32] Erlang Agner, Krarup. Solution of some problems in the theory of probabilities of significance automatic telephone exchanges. *Elektroteknikerer - Volume 13*, 1917.
- [33] Engset Tore, Olaus. On the calculation of switches in an automatic telephone system. *Tore Olaus Engset : The man behind the formula, first published*, 1915.
- [34] Richard J Boucherie and Nico M van Dijk. *Queueing networks : a fundamental approach*, volume 154. Springer Science & Business Media, 2010.
- [35] JW Cohen. The generalized engset formulae. *Philips Telecommunication Review*, 1957.
- [36] Murad S Taqqu, Walter Willinger, and Robert Sherman. Proof of a fundamental result in self-similar traffic modeling. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 1997.
- [37] Michela Meo and Marco Ajmone Marsan. Resource management policies in gprs systems. *Performance Evaluation*, 56(1) :73–92, 2004.
- [38] Thomas Bonald and Alexandre Proutiere. Insensitivity in processor-sharing networks. *Performance Evaluation*, 49(1) :193–209, 2002.
- [39] Thomas Bonald. Insensitive queueing models for communication networks. In *Proceedings of the 1st international conference on Performance evaluation methodologies and tools*, page 57. ACM, 2006.
- [40] Arthur W Berger and Yaakov Kogan. Dimensioning bandwidth for elastic traffic in high-speed data networks. *IEEE/ACM Transactions on networking*, 8(5) :643–654, 2000.

- [41] Daniel P Heyman, TV Lakshman, and Arnold L Neidhardt. A new method for analysing feedback-based protocols with applications to engineering web traffic over the internet. In *ACM Sigmetrics performance evaluation review*, volume 25, pages 24–38. ACM, 1997.
- [42] S Ben Fred, Thomas Bonald, Alexandre Proutiere, Gwénaél Régnié, and James W Roberts. Statistical bandwidth sharing : a study of congestion at flow level. In *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*. ACM, 2001.
- [43] Laurent Massoulie and James W Roberts. Bandwidth sharing and admission control for elastic traffic. *Telecommunication systems*, 2000.
- [44] Christian Schindelhauer. Mobility in wireless networks. In *SOFSEM 2006 : Theory and Practice of Computer Science*, pages 100–116. Springer, 2006.
- [45] Xingqin Lin, Radha Krishna Ganti, Peter J Fleming, and Jeffrey G Andrews. Towards understanding the fundamentals of mobility in cellular networks. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, 2013.
- [46] Mahmood M. Zonoozi and Prem Dassanayake. User mobility modeling and characterization of mobility patterns. *IEEE Journal on selected areas in communications*, 15(7) :1239–1252, 1997.
- [47] Izhak Rubin and Cheon Won Choi. Impact of the location area structure on the performance of signaling channels in wireless cellular networks. *IEEE Communications Magazine*, 35(2) :108–115, 1997.
- [48] Amotz Bar-Noy, Ilan Kessler, and Moshe Sidi. Mobile users : To update or not to update ? *Wireless Networks*, 1(2) :175–185, 1995.
- [49] Ben Liang and Zygmunt J Haas. Predictive distance-based mobility management for pcs networks. In *INFOCOM'99. Eighteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, volume 3, pages 1377–1384. IEEE, 1999.
- [50] Xiaoyan Hong, Mario Gerla, Guangyu Pei, and Ching-Chuan Chiang. A group mobility model for ad hoc wireless networks. In *Proceedings of the 2nd ACM international workshop on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*, pages 53–60. ACM, 1999.
- [51] Thomas Bonald, Sem C Borst, and Alexandre Proutière. How mobility impacts the flow-level performance of wireless data systems. In *INFOCOM 2004. Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*. IEEE, 2004.
- [52] Thomas Bonald, Sem Borst, Nidhi Hegde, Matthieu Jonckheere, and Alexandre Proutiere. Flow-level performance and capacity of wireless networks with user mobility. *Queueing Systems*, 2009.
- [53] Sem C Borst, Alexandre Proutiere, and Nidhi Hegde. Capacity of wireless data networks with intra-and inter-cell mobility. In *INFOCOM*, 2006.

- [54] Mohamed Kadhem Karray. User's mobility effect on the performance of wireless cellular networks serving elastic traffic. *Wireless Networks*, 2011.
- [55] Salah Eddine Elayoubi, Younes Khadraoui, Bruno Baynat, and Taoufik En-Najjary. Flow level performance evaluation in mobile networks : Analytical modeling and empirical validation. *Computer Communications*, 108 :27–35, 2017.
- [56] Onno Johan Boxma and IA Kurkova. The m/m\1 queue in a heavy-tailed random environment. *Statistica Neerlandica*, 54(2) :221–236, 2000.
- [57] Onno Johan Boxma and IA Kurkova. The m/g/1 queue with two service speeds. *Advances in Applied Probability*, 33(2) :520–540, 2001.
- [58] Masoud Sharif and Babak Hassibi. A delay analysis for opportunistic transmission in fading broadcast channels. In *INFOCOM 2005. 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings IEEE*, volume 4, pages 2720–2730. IEEE, 2005.
- [59] Tejinder S Randhawa and RH Stephen Hardy. Performance analysis of multi-service cellular networks with mobile users. In *Wireless Communications and Networking Conference, 2000. WCNC. 2000 IEEE*, volume 3, pages 1390–1397. IEEE, 2000.
- [60] Helmut Hlavacs, Günter Haring, A Kamra, and M Bansal. Modelling resource management for multi-class traffic in mobile cellular networks. In *System Sciences, 2002. HICSS. Proceedings of the 35th Annual Hawaii International Conference on*, pages 1539–1548. IEEE, 2002.
- [61] Frank Delcoigne, Alexandre Proutiere, and Gwénaél Régnié. Modeling integration of streaming and data traffic. *Performance Evaluation*, 55(3) :185–209, 2004.
- [62] Chadi Tarhini and Tijani Chahed. Modeling of streaming and elastic flow integration in ofdma-based ieee802.16 wimax. *Computer Communications*, 30(18) :3644–3651, 2007.
- [63] S-E Elayoubi, O Ben Haddada, and Benoît Fourestié. Performance evaluation of frequency planning schemes in ofdma-based networks. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, 7(5) :1623–1633, 2008.
- [64] G Alcatel. 3gpp tsg ran wg1 meeting# 44-system simulation results for downlink interference coordination. Technical report, Technical Report available as R1-060209, 3GPP, 2006.
- [65] May Huawei. Soft frequency reuse scheme for utran lte. *3GPP R1-050507*, 2005.
- [66] Petteri Kela, Jani Puttonen, Niko Kolehmainen, Tapani Ristaniemi, Tero Henttonen, and Martti Moisio. Dynamic packet scheduling performance in ultra long term evolution downlink. In *Wireless Pervasive Computing, 2008. ISWPC 2008. 3rd International Symposium on*, pages 308–313. IEEE, 2008.
- [67] Na Wei, Akhilesh Pokhariyal, Troels B Sorensen, Troels E Kolding, and Preben E Mogensen. Performance of mimo with frequency domain packet scheduling in utran lte downlink. In *Vehicular Technology Conference, 2007. VTC2007-Spring. IEEE 65th*, pages 1177–1181. IEEE, 2007.

- [68] Junxian Huang, Feng Qian, Alexandre Gerber, Z Morley Mao, Subhabrata Sen, and Oliver Spatscheck. A close examination of performance and power characteristics of 4g lte networks. In *Proceedings of the 10th international conference on Mobile systems, applications, and services*, pages 225–238. ACM, 2012.
- [69] Robert Müllner, Carsten F Ball, Kolio Ivanov, Johann Lienhart, and Peter Hric. Contrasting open-loop and closed-loop power control performance in utran lte uplink by ue trace analysis. In *Communications, 2009. ICC'09. IEEE International Conference on*, pages 1–6. IEEE, 2009.
- [70] Pål Grønsund, Paal Engelstad, Torbjørn Johnsen, and Tor Skeie. The physical performance and path loss in a fixed wimax deployment. In *Proceedings of the 2007 international conference on Wireless communications and mobile computing*, pages 439–444. ACM, 2007.
- [71] Zihuai Lin, Branka Vucetic, and Jian Mao. Ergodic capacity of lte downlink multiuser mimo systems. In *Communications, 2008. ICC'08. IEEE International Conference on*, pages 3345–3349. IEEE, 2008.
- [72] Sébastien Doirieux, Bruno Baynat, Masood Maqbool, and Marceau Coupechoux. An efficient analytical model for the dimensioning of wimax networks supporting multi-profile best effort traffic. *Computer Communications*, 33(10) :1162–1179, 2010.
- [73] Junxian Huang, Qiang Xu, Birjodh Tiwana, Z Morley Mao, Ming Zhang, and Paramvir Bahl. Anatomizing application performance differences on smartphones. In *Proceedings of the 8th international conference on Mobile systems, applications, and services*, pages 165–178. ACM, 2010.
- [74] Matthias Grossglauser and David Tse. Mobility increases the capacity of ad-hoc wireless networks. In *INFOCOM 2001. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, volume 3, pages 1360–1369. IEEE, 2001.
- [75] Wolfgang Bziuk, Said Zaghoul, and Admela Jukan. A novel framework for handoff analysis under generalized session and mobility statistics. In *Proceedings of the 13th ACM international conference on Modeling, analysis, and simulation of wireless and mobile systems*, pages 141–150. ACM, 2010.
- [76] Anis Jdidi and Tijani Chahed. Flow-level performance of proportional fairness with hierarchical modulation in ofdma-based networks. *Computer Networks*, 2011.
- [77] EG Coffman, Anatolii A Puhalskii, Martin I Reiman, and Paul E Wright. Processor-shared buffers with reneging. *Performance Evaluation*, 19(1) :25–46, 1994.
- [78] Thomas Bonald and Alexandre Proutière. Wireless downlink data channels : user performance and cell dimensioning. pages 339–352, 2003.
- [79] Nivine Abbas, Thomas Bonald, and Berna Sayrac. Opportunistic gains of mobility in cellular data networks. In *13th International Symposium on Modeling and*

Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOpt), 2015, pages 315–322. IEEE, 2015.

- [80] 3GPP. 3gpp ts 36.213 v9.2.0 (2010-06) : Physical layer procedures.
- [81] Chadi Tarhini and Tijani Chahed. Qos-oriented resource allocation for streaming flows in ieee802.16e mobile wimax. *Telecommunication Systems*, 51(1) :65–71, 2012.
- [82] Khalil Ibrahimi, Rachid El-Azouzi, Sujit K Samanta, and El-Houssine Bouyakhf. Adaptive modulation and coding scheme with intra-and inter-cell mobility for hsdpa system. In *2009 Sixth International Conference on Broadband Communications, Networks, and Systems*, pages 1–8. IEEE, 2009.
- [83] I Ward Whitt. Ieor 4701 : Professor whitt lecture notes, monday, july 16, 2007 introduction to markov chains. 2007.
- [84] Thiago Abreu, Bruno Baynat, Marouen Gachaoui, Tania Jiménez, and Narcisse Nya. Comparative study of lte simulations with the ns-3 and the vienna simulators. In *Proceedings of the 8th International Conference on Simulation Tools and Techniques*, pages 55–63. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering), 2015.