

Université de Québec
INRS-Énergie, Matériaux et Télécommunications

Stratégies d'annulation d'interférence sur le lien descendant d'un réseau sans fil LTE hétérogène

Par
Ahmed Latrach

Mémoire de maîtrise

Examineur Interne	M. Charles Despins INRS-EMT
Examineur externe	M. Paul Fortier Univ. Laval
Directeur de recherche	M. Sofiène Affes INRS-EMT

Automne 2012

Remerciements

Je loue Dieu tout puissant de m'avoir donné la vie, la santé et d'avoir fait de moi ce que je suis aujourd'hui. C'est grâce à lui que ce présent travail a vu le jour.

Je tiens, à exprimer ma gratitude et mes remerciements à mon directeur de recherche **Pr. Sofiène Affes**. Je le remercie de m'avoir donné l'opportunité de rejoindre son équipe de recherche, de son encadrement précieux et de sa patience.

J'exprime également ma gratitude la plus profonde pour **Mme Raouia Nasri Naas**, qui n'a pas épargné d'efforts pour m'aider à réaliser ce travail et qui a été toujours disponible pour écouter, discuter et m'orienter à entreprendre les bonnes décisions.

Mes remerciements sont également aux membres de jury pour l'intérêt qu'ils ont manifesté pour évaluer mon travail de maîtrise.

Résumé

Les systèmes de communication mobile subissent une croissance constante en termes de nombre d'abonnés. De plus, ces usagers exigent toujours une meilleure qualité de service et une vaste couverture caractérisée par un fort signal, notamment dans les zones à faible couverture. Pour faire face à ces défis, un nouveau concept de réseau hétérogène (HetNet) a été adopté. Le réseau HetNet est un réseau déployant différents types de cellules (cellules macros et cellules femtos), afin d'améliorer la performance du réseau et remédier aux problèmes de zones à faible couverture. Cependant, la coexistence de ces différentes couches de cellules génère de l'interférence au niveau du lien descendant qui peut affecter la qualité de signal offerte aux usagers. Cette interférence résulte donc en une dégradation des performances du réseau HetNet.

Par conséquent, on propose dans ce mémoire une stratégie d'annulation de l'interférence sur le lien descendant (DL-IC) pour le réseau HetNet LTE. Cette stratégie vise à réduire l'impact de l'interférence sur les usagers en optimisant leurs rapports signal sur interférence et bruit reçus (SINRs). La stratégie proposée se base sur le concept de fonctions d'utilité pour les usagers macros et femtos permettant de relaxer les coefficients d'annulation dans le but de réduire le degré de complexité d'implémentation tout en maximisant le SINR, la qualité de service et le débit. Afin de pouvoir évaluer la performance de la stratégie proposée, on a adapté et validé un simulateur LTE au niveau système pour supporter la configuration du réseau HetNet LTE. On a utilisé le simulateur développé pour vérifier les performances du réseau HetNet LTE. On a prouvé également à travers des simulations au niveau système que la stratégie DL-IC proposée permet d'améliorer la performance globale du réseau et l'expérience utilisateur en termes de capacité totale du réseau et du SINR reçu. Les gains en débit achevés par la stratégie DL-IC peuvent atteindre jusqu'à 200% par rapport au réseau LTE homogène sans annulation d'interférence plus un extra de 48% par cellule femto additionnelle comparé à ceux d'un réseau HetNet LTE de base sans annulation d'interférence.

Mots-clés : HetNet LTE, Cellule femto, HeNB, Cellule macro, eNB, Interférence DL, Contraintes d'annulation, Simulation

Abstract

Mobile communication systems undergo constant growth in terms of number of subscribers. In addition, these users require increasingly better quality of service and a wide coverage characterized by strong signal, specifically in low coverage areas. To cope with these challenges, a new concept of Heterogeneous Network (HetNet) was adopted. In HetNet, the network integrates small coverage cells, called femtocells, in conjunction with the existing macrocells. This new cell layer added to the network generates interference which can obstruct neighboring macro user equipment (MUE) and femto user equipment (FUE). In fact, this interference results in degradation of the network performance.

In this work, we propose a downlink interference cancellation (DL-IC) strategy for LTE HetNet. This DL-IC strategy aims to reduce interference impact on users by optimizing their received signal to interference plus noise ratios (SINRs) based on new utility functions for both FUEs and MUEs. The DL-IC strategy we propose relies on utility functions that allow relaxation of cancellation ratios in order to reduce implementation complexity while maximizing SINR, QoS and throughput. In order to evaluate the proposed strategy performance, we adapt and validate a system-level LTE simulator to support LTE HetNet configuration. We use the developed LTE HetNet simulator to verify LTE HetNet performances. We support also by different system-level simulations that both global network performance and user experience in terms of total throughput and received SNR or link-level throughput, respectively, are significantly enhanced. Throughput gains achievable by the new DL-IC strategy can reach as much as 200% against a homogeneous LTE network without IC along with an extra 48% per additional femtocell base station against a basic LTE HetNet without IC.

Keywords : LTE HetNet, Femtocell, HeNB, Macrocell, eNB, DL Interference, Cancellation constraints, Simulation

Table des matières

Remerciements	i
Résumé	iii
Abstract	v
Table des matières	vii
Table des figures	ix
Liste des tableaux	xi
Liste des symboles	xiii
Introduction générale	1
1 LTE et HetNet LTE	5
1.1 Historique	5
1.2 Le système LTE	6
1.2.1 Les spécifications du LTE	6
1.2.2 Les technologies du système LTE	7
1.2.3 L'architecture de LTE	9
1.3 Le système LTE-Advanced	11
1.3.1 Les spécifications du système IMT-Advanced	12
1.3.2 Les caractéristiques du système LTE-Advanced	13
1.3.3 Les technologies clés de LTE-Advanced	14
1.4 Le réseau HetNet LTE	18
1.4.1 La cellule macro	18
1.4.2 La cellule pico	18
1.4.3 La cellule femto	19
1.5 Le concept de cellule femto	19
1.5.1 Définition	19
1.5.2 Avantages	20
1.5.3 Fonctionnement	20
1.5.4 Architecture	21
1.5.5 Défis et problèmes	21

1.6	Les cellules femtos dans le réseau HetNet LTE	22
1.6.1	Architecture	22
1.6.2	Fonctionnement	25
2	Etude de performances du réseau HetNet LTE	29
2.1	Intégration d'une cellule femto dans le réseau HetNet LTE	29
2.1.1	Auto-configuration des paramètres d'une cellule femto	29
2.1.2	Fonctionnalité d'écoute du réseau	32
2.1.3	Auto-optimisation des paramètres d'une cellule femto	34
2.2	Simulation du réseau HetNet LTE	34
2.2.1	Simulation SLS du réseau HetNet LTE	35
2.2.2	Le simulateur HetNet LTE « System Level »	36
2.2.3	Scénarios et paramètres de simulation	42
2.2.4	Résultats de simulation	44
3	L'annulation de l'interférence DL dans un réseau HetNet LTE	47
3.1	Le modèle du système	47
3.2	Principe de la stratégie d'annulation de l'interférence DL	48
3.2.1	Principe de base	49
3.2.2	La première stratégie	50
3.2.3	La deuxième stratégie	51
3.2.4	La troisième stratégie	51
3.3	Implémentation des stratégies	57
3.4	Évaluation de performances des stratégies	58
3.4.1	Paramètres de simulation	58
3.4.2	Réglage de paramètre	59
3.4.3	Performance globale du réseau	60
3.4.4	Contraintes d'annulation	64
3.4.5	Optimisation de la stratégie DL-IC	65
	Conclusion générale	75
	Bibliographie	77

Table des figures

0.1	Développement global des TICs.	1
1.1	Généralisations des systèmes de communication mobile [1].	6
1.2	Architecture générale du système EPS.	9
1.3	Architecture du réseau d'accès E-UTRAN [16].	11
1.4	Agrégation de sous-porteuses.	15
1.5	Nombre maximal de flots pour les deux systèmes LTE version 8 et LTE-Advanced. . .	16
1.6	Le nœud de relai dans LTE-Advanced	16
1.7	Architecture logique HeNB E-UTRAN [9].	23
1.8	Architecture d'ensemble du E-UTRAN du réseau HetNet LTE [9].	24
2.1	Procédure de démarrage d'une cellule femto [76].	30
2.2	Rapport de mesure retourné par l'UE à la cellule femto [76].	31
2.3	Fonctionnalité d'écoute du réseau [76].	33
2.4	Schéma fonctionnel du simulateur HetNet LTE SL.	37
2.5	Le pathloss macroscopique d'une section d'une cellule macro.	39
2.6	Courbes de BLER pour le AWGN.	41
2.7	Mappage SINR-CQI.	42
2.8	Schéma du réseau initial (scénario référence).	43
2.9	Débits des couches de cellules du réseau HetNet LTE.	45
2.10	Gain en débit du réseau HetNet LTE comparé au réseau LTE homogène.	46
3.1	Courbe représentative de la fonction $U_{m,u}$ ($\alpha_m = 1$).	54
3.2	Courbe représentative de la fonction $U_{f,u}$ ($W = 5$ MHz).	55
3.3	Gains en débit pour la 3ème stratégie proposée comparés au réseau LTE homogène pour différentes valeurs de β_m	59
3.4	Débits du réseau pour la 3ème stratégie proposée comparés au réseau LTE homogène pour différentes valeurs de β_m	60
3.5	Gains en débit pour les trois stratégies d'annulation proposées comparés au réseau LTE homogène.	61
3.6	Débits du réseau pour les trois stratégies d'annulation proposées comparés au réseau LTE homogène.	62
3.7	Débit total du réseau pour l'algorithme DL-PC et la stratégie DL-IC proposée ($\beta_m = 10^{-3}$).	63
3.8	Fonctions CDF des contraintes d'annulation pour différents scénarios de déploiement de cellules femtos.	64

3.9	Gains en débit du réseau comparé au réseau LTE homogène pour différentes valeurs de A_u ($\beta_m = 10^{-3}$).	66
3.10	Gains en débit du réseau comparé au réseau LTE homogène pour différentes valeurs de A_l ($\beta_m = 10^{-3}, A_u = 1$).	67
3.11	Gains en débit du réseau comparé au réseau LTE homogène pour différentes valeurs de A_l ($A_u = 10^{-2}$).	69
3.12	Fonctions CDF des contraintes d'annulation de la stratégie DL-IC optimisée.	70
3.13	Gains en débit du réseau comparé au réseau LTE homogène pour différentes valeurs de N_c ($A_l = 0$).	72
3.14	Courbes du gain en débit pour différentes valeurs de N_c ($A_l = 10^{-2}$).	73

Liste des tableaux

1.1	Spécifications du système LTE.	7
1.2	Caractéristiques du système LTE-Advanced.	14
2.1	Paramètres de simulation.	44
3.1	Paramètres de simulation.	58

Liste des symboles

16-QAM	16-Quadrature Amplitude Modulation
3GPP	3rd Generation Partnership Project
4-QAM	4-Quadrature Amplitude Modulation
64-QAM	64-Quadrature Amplitude Modulation
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BLER	Block Error Rate
BS	Base Station
CA	Carrier Aggregation
CDMA	Code Division Multiple Access
CP	Cyclic Prefix
CQI	Channel Quality Indicator
DECT	Digital Enhanced Cordless Telecommunications
DeNB	Donor eNode B
DL	DownLink
DLSCH	DownLink Shared CHannel
E-UTRAN	Evolved-UTRAN
EDGE	Enhanced Data rates for GSM Evolution
EESM	Exponential Effective SINR Mapping
eNB	enhanced Node B
EPC	Evolved Packet Core
FAP	Femtocell Access Point
FDD	Frequency Division Duplexing
FFR	Fractional Frequency Reuse
FUE	Femto User Equipment

GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile communication
HeNB	Home eNode B
HeNB GW	Home eNode B Gateway
HeNBS	Home eNode B Sub-system
HetNet	Heterogeneous Network
HII	High Interference Indicator
HNB	Home Node B
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HSPA	High Speed Packet Access
HSS	Home Subscriber Server
IMS	IP Multimedia Subsystem
IMT-2000	International Mobile Telecommunications 2000
IOI	Interference Overload Indicator
ITU	International Telecommunication Union
KPI	Key Performance Indicator
LAC	Location Area Code
LIPA	Local IP Access
LL	Link Level
LLS	Link Level Simulation
LTE	Long Term Evolution
MAC	Media Access Control
MCS	Modulation and Coding Scheme
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
MME	Mobility Management Entity
MR	Measurement Report
MU-MIMO	Multi User-MIMO
MUE	Macro User Equipment
NAS	Non Access Stratum
NTP	Network Time Protocol

OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
OLSM	Open Loop Spatial Multiplexing
OOP	Object-Oriented Programming
P-GW	PDN GateWay
PAR	Peak-to-Average Ratio
PCI	Physical Cell Identity
PCRF	Policy Control and Charging Rules Function
PFR	Partial Frequency Reuse
PLMN ID	Public Land Mobile Network IDentificator
QoS	Quality of Service
RAB	Radio Access Bearer
RAC	Routing Area Code
RB	Resource Block
RN	Relay Node
RNTP	Relative Narrowband Tx Power
ROI	Region Of Interest
RSSI	Received Signal Strength Indication
SAE	System Architecture Evolution
SC-FDMA	Single-Carrier Frequency-Division Multiple Access
SFR	Soft Frequency Reuse
SGSN	Serving GPRS Support Node
SGW	Serving GateWay
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio
SISO	Single Input Single Output
SL	System Level
SLS	System Level Simulation
SON	Self Optimization Network
SU-MIMO	Single User-MIMO
TAC	Tracking Area Code
TB	Transport Bloc

TDD	Time-Division Duplexing
TTI	Transmission Time Interval
TxD	Transmission Diversity
UE	User Equipement
UIT	Union Internationale des Télécommunications
UL	UpLink
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UTRAN	Universal Terrestrial Radio Access Network
VoIP	Voice over IP
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
ZF	Zero Forcing

Introduction générale

Les systèmes de communication mobile subissent une croissance incessante en termes de nombre d'abonnés. En effet, le rapport ITU-R M.2072[43] présente une analyse du marché et des prévisions de l'évolution du marché des mobiles et de ses services pour le développement futur des systèmes de communication sans fil IMT-2000. De même, le rapport de recommandation de l'ITU-R M.1645[51] décrit en détails ces tendances, comprenant une demande croissante de services mobiles. Ceci résulte en une augmentation des attentes des utilisateurs et une évolution des services et des applications qui pourraient devenir disponibles. La figure suivante représente l'évolution des abonnés des différentes technologies de communication et de l'information durant la décennie 2001-2011 [44].

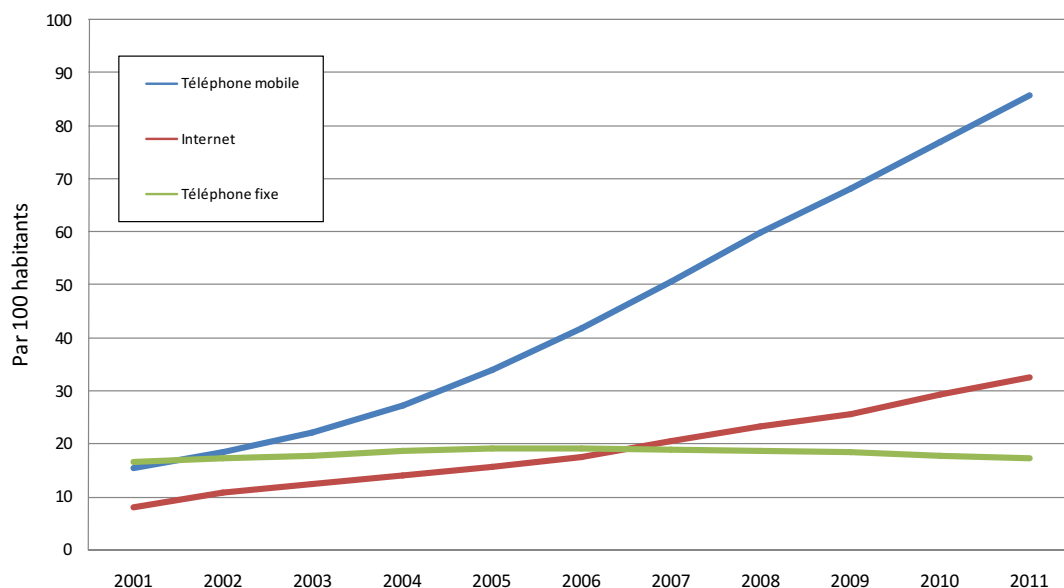


FIGURE 0.1: Développement global des TICs.

Cette figure confirme la tendance des usagers des systèmes de communication à utiliser de plus en plus leurs téléphones mobiles que leurs téléphones fixes ou leurs connexions Internet résidentielles. De plus, dans son rapport sur l'évolution des systèmes de communication sans fil [44], l'ITU

annonce que vers la fin de 2011, le nombre de personnes abonnées aux services de communication mobile a atteint 6 milliards d'abonnés, avec un taux total de pénétration de l'ordre de 86%.

Par ailleurs, ces derniers exigent de plus en plus une meilleure qualité de service, ainsi qu'une vaste couverture caractérisée par un fort signal, spécifiquement dans les zones à faible couverture telles qu'une résidence ou une entreprise.

Pour faire face à ces défis, un nouveau concept a été adopté par les systèmes de communication sans fil. Ce concept consiste à mettre en place, conjointement avec les cellules existantes du réseau, des cellules de petite taille, formant ainsi un réseau dit hétérogène. Ce nouveau concept a été adopté par plusieurs systèmes de communication sans fil afin d'augmenter la capacité de leurs réseaux, de maintenir leur couverture et satisfaire les exigences de qualité de service demandées par leurs clients. Parmi les systèmes de communication sans fil qui ont adopté le concept de réseau hétérogène, on cite le système Long Term Evolution (LTE), développé par le groupe 3rd Generation Partnership Project (3GPP).

Cependant, ce nouveau type de cellules risque de générer des scénarios d'interférence qui peuvent avoir un impact négatif sur la qualité de service offerte aux clients. Des travaux de recherche sont alors en cours dans le but de remédier à ce problème et exploiter les bénéfices de ces nouvelles cellules sans affecter la performance du réseau.

Par conséquent, l'objectif principal de ce travail est de concevoir une nouvelle stratégie qui permet pour chaque usager de sélectionner d'une façon optimale les signaux interférents reçus à annuler afin de réduire l'impact de l'interférence reçue sur le signal désiré. Après la conception de la stratégie proposée et l'analyse analytique de son impact notamment sur la qualité de signal reçu par chaque usager, nous prouvons l'efficacité de cette stratégie à travers différents travaux de simulation au niveau système d'un réseau hétérogène déployant cette stratégie.

De ce fait, dans nos travaux de recherche, nous avons étudié le concept de réseau hétérogène LTE, appelé HetNet LTE, déployant de nouvelles petites cellules. En effet, nous avons adapté et validé un simulateur du réseau LTE homogène à une configuration de réseau HetNet LTE en insérant une nouvelle couche de cellules femtos dans le réseau. En exploitant ce nouveau simulateur HetNet LTE, nous avons évalué l'impact de l'insertion de cette nouvelle couche de cellules sur la performance du réseau, notamment en termes de gain en débit et amélioration de la capacité totale du réseau. De plus, nous avons proposé une nouvelle stratégie d'annulation d'interférence sur le lien descendant permettant de résoudre le problème d'interférence causée par la coexistence des cellules macros et femtos et d'exploiter entièrement les bénéfices du réseau HetNet sans contre-affecter la performance du réseau. La stratégie proposée se distingue par la simplicité de son concept en exigeant un effort minimal de coordination et en permettant aux usagers de transmettre simultanément sans avoir recours à des restrictions d'allocation des ressources temporelles et/ou fréquentielles. La stratégie proposée diffère aussi des autres stratégies par l'exploitation des fonctions d'utilité qui permettent de maximiser le débit et la qualité de service tout en minimisant les coûts qui résultent des efforts d'annulation. Nous avons développé aussi deux autres stratégies d'annulation d'interférence afin de bien évaluer la performance de la stratégie proposée. Les simulations du niveau système montrent que cette nouvelle stratégie offre des gains en débit prometteurs comparés à la performance du réseau HetNet LTE de base sans annulation d'interférence.

Le reste de ce rapport est composé de trois chapitres : dans le premier, on étudie en détails le système HetNet LTE, son architecture, ses composants ainsi que le concept général de cellule femto. Ensuite, on aborde dans le deuxième chapitre la procédure d'intégration de la cellule femto dans le réseau LTE, et on évalue ensuite les performances du réseau HetNet LTE. Enfin, dans le

dernier chapitre, on représente les stratégies d'annulation d'interférence développées, ainsi que l'évaluation de leurs performances et leurs impacts sur le réseau HetNet LTE.

Chapitre 1

LTE et HetNet LTE

Introduction

Le réseau HetNet est une solution adoptée par plusieurs systèmes de communication sans fil afin de surpasser les limites de la capacité du réseau, et résoudre les problèmes de régions sans couverture ou à faible signal. Par exemple, le groupe 3GPP a commencé à intégrer ce concept de réseau HetNet depuis la version 8 du système LTE et dans les systèmes qui le succèdent.

Afin de bien étudier le réseau HetNet LTE, on commence tout d'abord par une étude détaillée du réseau LTE, son architecture, ses spécifications ainsi que son fonctionnement. Ensuite, on présente le concept de cellule femto, son architecture et son mode de fonctionnement. A la fin de ce chapitre, on étudie les différentes entités du réseau HetNet LTE ainsi que les différentes fonctionnalités implémentées dans ce réseau.

1.1 Historique

Les premiers pas vers le système Long Term Evolution (LTE) ont été pris en Novembre 2004 à l'atelier « RAN evolution ». Cet atelier a été organisé par le groupe « 3rd Generation Partnership Project » (3GPP) pour présenter des travaux de contribution à l'évolution du réseau Terrestrial Radio Access Network (UTRAN) du système Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) vers une nouvelle génération appelée « Evolved UTRAN (E-UTRAN) ». Peu de temps après, en Décembre 2004, une étude de faisabilité a été lancée avec comme objectif de définir la stratégie de développement du UTRAN LTE [24].

L'organisation 3GPP elle-même a été créée en 1998 après un accord entre les acteurs de l'industrie de communication mobile dans le but de préparer, approuver et de maintenir des normes mondialement applicables pour les systèmes Global System for Mobile communication (GSM), General Packet Radio Service (GPRS) et Enhanced Data rates for GSM Evolution (EDGE) [1, 3]. Plus tard, le groupe 3GPP a été élargi pour inclure également les systèmes de communication mobile 3G et au-delà de 3G sur la base des réseaux 3GPP [24].

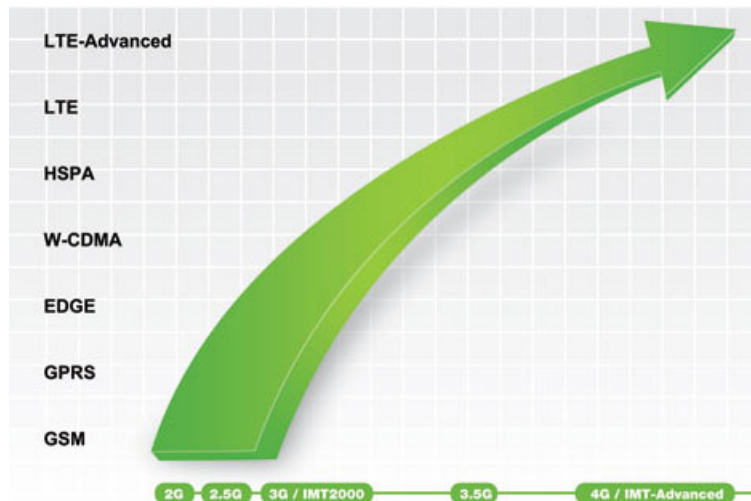


FIGURE 1.1: Générations des systèmes de communication mobile [1].

Le but du développement de LTE était de s'assurer que les systèmes 3G soient compétitifs à l'avenir avec des liens plus étroits à l'Internet et les applications nécessitant des débits élevés. Ceci est effectué grâce à un système de communication de paquets IP moins complexe et caractérisé par un débit élevé, une faible latence et une largeur de bande souple [3, 31].

En décembre 2008, la version 8 de la norme LTE a été validée, y compris le réseau radio (E-UTRAN) et le réseau central System Architecture Evolution (SAE). La norme LTE était à cette époque considérée comme un système stable et seulement quelques améliorations mineures ont été ajoutées à la version 9 qui a été validée en décembre 2009 [2].

1.2 Le système LTE

Les principales exigences pour LTE telles qu'un débit plus élevé (en particulier au niveau des bords de cellules), une latence plus faible et une architecture système moins complexe se traduisent par des exigences d'efficacité du spectre plus élevée et une architecture du système plus plate.

1.2.1 Les spécifications du LTE

La mise en place du réseau LTE avait pour objectif de satisfaire aux exigences suivantes [23] :

- D'une part, un pic instantané du débit descendant des données doit atteindre 100 Mb/s pour une allocation spectrale de la liaison descendante (DL) de 20 MHz. D'autre part, un pic instantané du débit ascendant de l'ordre de 50 Mb/s doit être atteint pour la même allocation spectrale de la liaison ascendante (UL).
- Une latence du plan de contrôle inférieure à 100 ms.
- Une latence du plan usager inférieur à 5 ms.
- Au moins 200 utilisateurs par cellule doivent être pris en charge dans l'état actif pour une allocation spectrale allant jusqu'à 5 MHz.

- Un débit DL moyen par usager par MHz 3 ou 4 fois supérieur à celui de la version 6 HSDPA et un débit UL moyen par usager par MHz 2 ou 3 fois supérieure à celui de la version 6 Enhanced Uplink.
- L'efficacité spectrale DL (bits/s/Hz/site) doit être 3 ou 4 fois supérieur à celle de la version 6 HSDPA. De plus, une efficacité spectrale UL (bits/s/Hz/site) 2 ou 3 fois supérieure à celle de la version 6 Enhanced Uplink doit être assurée.
- Une vitesse du mobile entre 15 et 120 Km/h doit être supportée avec une meilleure performance. De plus, la mobilité entre les cellules du réseau doit être maintenue pour une vitesse du mobile entre 120 et 350 Km/h.
- Le réseau doit fonctionner dans des allocations spectrales de tailles différentes, y compris 1,25 MHz, 1,6 MHz, 2,5 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz et allant jusqu'à 20 MHz, à la fois sur le lien UL et le lien DL.
- La prise en charge améliorée de la qualité de service(QoS) de bout en bout.

Le tableau suivant résume les différentes spécifications du système LTE.

Indicateurs de performance	LTE Release 8	
Pic de débit (Mb/s) (20 MHz)	DL	100
	UL	50
Latence du plan de contrôle (ms)	≤ 100	
Latence du plan usager (ms)	≤ 5	
Largeur de bande (MHz)	jusqu'à 20	
Capacité VoIP	jusqu'à 200 usagers	

TABLE 1.1: Spécifications du système LTE.

1.2.2 Les technologies du système LTE

Afin d'atteindre des performances qui satisferont les exigences et les spécifications définies, le système LTE a été développé en adoptant de nouvelles technologies. Les principales technologies qui ont été choisies incluent Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM) en DL, Multiple-Input Multiple-Output (MIMO), l'ordonnancement sensible des ressources, l'adaptation de lien, le contrôle de puissance, l'architecture de réseau orientée paquets, des garanties de QoS ainsi que d'autres mécanismes situés dans la station de base. Dans cette section, on discutera quelques-unes de ces technologies.

1.2.2.1 OFDM

OFDM est un procédé de codage de données numériques sur des fréquences porteuses multiples. Cette technique a été développée pour la communication numérique à large bande. Le principe de OFDM consiste à répartir sur un grand nombre de sous-porteuses le signal numérique que l'on veut transmettre [31]. Pour que les fréquences des sous-porteuses soient les plus proches possibles et ainsi transmettre le maximum d'informations sur une portion de fréquences donnée, OFDM utilise des sous-porteuses orthogonales entre elles. Les signaux des différentes sous-porteuses se chevauchent mais, grâce à l'orthogonalité, elles n'interfèrent pas entre elles.

L'orthogonalité permet également une haute efficacité spectrale, la bande passante étant quasiment utilisée dans son intégralité.

Par conséquent, la technique OFDM a été incorporée dans LTE pour plusieurs raisons. Tout d'abord, en raison du temps du symbole OFDM relativement long en combinaison avec un préfixe cyclique, OFDM offre un haut degré de robustesse contre la sélectivité de fréquence du canal. De plus, OFDM fournit un accès au domaine fréquentiel, ce qui permet un degré supplémentaire de liberté de l'ordonnancement par rapport au système High Speed Packet Access (HSPA) pour lequel seulement l'ordonnement temporel est possible.

Pour LTE, l'espacement entre deux sous-porteuses consécutives noté Δf est égal à 15 kHz [23]. D'autre part, le nombre de sous-porteuses dépend de la largeur de bande de transmission. Par exemple, ce nombre est de l'ordre de 600 sous-porteuses en cas de fonctionnement dans une allocation de spectre de 10 MHz.

Les régimes d'accès multiple de la couche physique du système LTE sont différents dans les deux sens de transmission, DL et UL. En effet, le régime d'accès multiple pour la transmission DL adopté par LTE est Orthogonal Frequency-Division Multiple Access (OFDMA) avec un préfixe cyclique (CP) [23]. Cette technique alloue différents ensembles de sous-porteuses aux différents utilisateurs. Les transmissions sont orthogonales entre elles et permettent donc de faire correspondre les symboles de données de chaque utilisateur aux sous-porteuses correspondantes. D'autre part, LTE a adopté la technique Single-Carrier Frequency-Division Multiple Access (SC-FDMA) avec un CP comme régime d'accès multiple pour la transmission UL [7]. SC-FDMA est un schéma de modulation hybride qui combine le bas rapport crête-à-moyenne (PAR) des formats de porteuse unique traditionnels du type GSM avec la résistance aux trajets multiples et la flexibilité de l'ordonnement de fréquence d'OFDM.

1.2.2.2 MIMO

La technique de transmission multi-antennes (MIMO) est une technique dans laquelle on utilise plusieurs antennes à l'émission et/ou plusieurs antennes à la réception. Cela permet donc de transmettre et de recevoir plusieurs flux de données à travers le même canal radio. Un système MIMO offre donc des débits plus importants par canal. De plus, la séparation physique des antennes permet d'exploiter la diversité spatiale du canal. Par conséquent, la technique MIMO permet d'obtenir un gain de diversité spatiale qui permet de stabiliser la qualité du lien radio. La technique MIMO peut alors être utilisée pour améliorer les performances du système, y compris la capacité du système (plus d'utilisateurs par cellule), une meilleure couverture (possibilité d'agrandir les cellules), ainsi que la fourniture d'une meilleure QoS.

Dans LTE, les technologies MIMO ont été largement utilisées pour améliorer le pic du débit du lien DL, la couverture de la cellule, ainsi que le débit moyen des cellules. Pour atteindre cet ensemble diversifié d'objectifs, LTE a adopté diverses technologies MIMO, y compris la diversité à l'émission, un seul usager MIMO (SU-MIMO) et multi-usagers MIMO (MU-MIMO) [6, 8, 23]. En effet, le schéma de diversité à l'émission est spécifié pour la configuration avec deux ou quatre antennes à l'émission pour le lien DL, et avec deux antennes à l'émission pour le lien UL. Quant au schéma SU-MIMO, il est spécifié pour la configuration avec deux ou quatre antennes à l'émission dans le sens descendant, qui prend en charge la transmission de plusieurs couches spatiales avec un maximum de quatre flux pour un équipement d'utilisateur donné (UE). D'autre part, le schéma MU-MIMO permet l'attribution de différentes couches spatiales à différents utilisateurs dans les

mêmes ressources temps-fréquence. Il est supporté à la fois dans la liaison montante ainsi que dans la liaison descendante.

1.2.3 L'architecture de LTE

Tandis que le mot « LTE » englobe l'évolution du réseau d'accès du système UMTS vers un réseau d'accès évolué appelé E-UTRAN, il est accompagné d'une évolution des composants non radio sous le nom de « l'évolution de l'architecture du système (SAE) », qui inclut le réseau Evolved Packet Core (EPC). Ensemble, LTE et SAE forment le système Evolved Packet System (EPS).

La figure suivante représente l'architecture générale du système EPS.

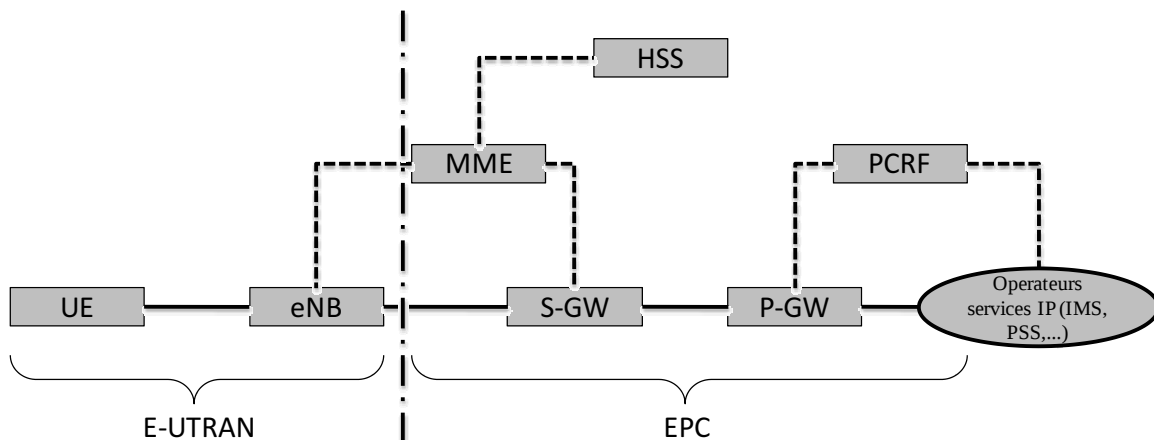


FIGURE 1.2: Architecture générale du système EPS.

1.2.3.1 Le réseau core EPC

L'EPC est le réseau core IP défini par le groupe 3GPP dans la version 8 pour être exploité par LTE et d'autres technologies d'accès. L'objectif de l'EPC est de fournir une architecture tout-IP simplifiée du réseau core afin de fournir un accès efficace à divers services tels que ceux fournis dans IP Multimedia Subsystem (IMS). Le EPC se compose principalement des entités suivantes : l'entité de gestion de mobilité (MME), la passerelle de service (S-GW), la passerelle PDN (P-GW), l'entité serveur de l'abonné résidentiel (HSS) et la fonction de politique de contrôle et de chargement des règles (PCRF).

On présente dans ce qui suit une description brève des entités de l'EPC.

1. **L'entité MME :** L'entité MME est un composant du système EPC. C'est une entité clé pour le contrôle des nœuds dans le réseau d'accès de LTE. MME se charge entre autres de [10] :
 - La signalisation avec le système Non Access Stratum (NAS).
 - La signalisation entre les nœuds du réseau core pour assurer la mobilité entre les réseaux d'accès 3GPP.
 - Le contrôle de la procédure de pagination et de localisation du UE en mode Idle.
 - La sélection de S-GW.
 - La sélection de MME durant un handover avec changement de MME.

- La sélection du nœud Serving GPRS Support Node (SGSN) durant le handover vers un réseau d'accès 2G ou 3G 3GPP.
 - L'authentification et le contrôle d'accès du UE.
2. **L'entité S-GW** : L'entité S-GW est une entité chargée d'acheminer les paquets de données de l'utilisateur. Elle sert aussi comme un point d'ancrage de mobilité lors du handover entre eNBs et lors du handover entre LTE et d'autres technologies 3GPP. Lorsque l'UE est en mode veille, le S-GW détermine le chemin du lien descendant et détecte la pagination lorsqu'un flux de données à télécharger arrive au UE. Il se charge aussi de marquer les paquets de la couche transport sur le lien UL et le lien DL [20].
 3. **La passerelle P-GW** : La P-GW assure la connectivité de l'utilisateur UE à des réseaux de paquets de données externes, remplissant la fonction d'entrée et de sortie pour les données du UE [22]. Ce dernier peut être connecté à plusieurs P-GW assurant l'accès à différents réseaux de paquets.
 4. **L'entité HSS** : La HSS est l'évolution de l'entité HLR des anciens réseaux. Cette entité contient alors les informations de souscription pour tous les réseaux (GSM, GPRS, UMTS, LTE et IMS). La HSS est donc une grande base de données qui est utilisée simultanément par les réseaux 2G, 3G, LTE et IMS appartenant à un même opérateur.
 5. **L'entité PCRF** : L'entité PCRF est déployée afin de détecter les flux de service et d'y appliquer les politiques de tarification. Cependant, un élément additionnel est requis pour les services et les applications nécessitant une politique de tarification dynamique. Cet élément additionnel est appelé fonction d'applications (AF).

1.2.3.2 Le réseau d'accès E-UTRAN

Le réseau d'accès E-UTRAN est composé principalement de stations de base appelées eNB (eNB). Une station de base eNB est responsable de la réception et la transmission radio avec l'UE. De plus, l'eNB prend en charge des fonctions de mesures radio et préparation de rapport de mesures utiles pour la gestion de mobilité ainsi que pour l'ordonnancement. Cet élément du réseau est responsable aussi de la sélection d'un MME pour chaque UE lors de la procédure d'attachement, si la configuration fournie à cet usager ne précise pas de MME. Plusieurs fonctions primordiales pour le fonctionnement du réseau sont prises en charge par l'élément radio eNB.

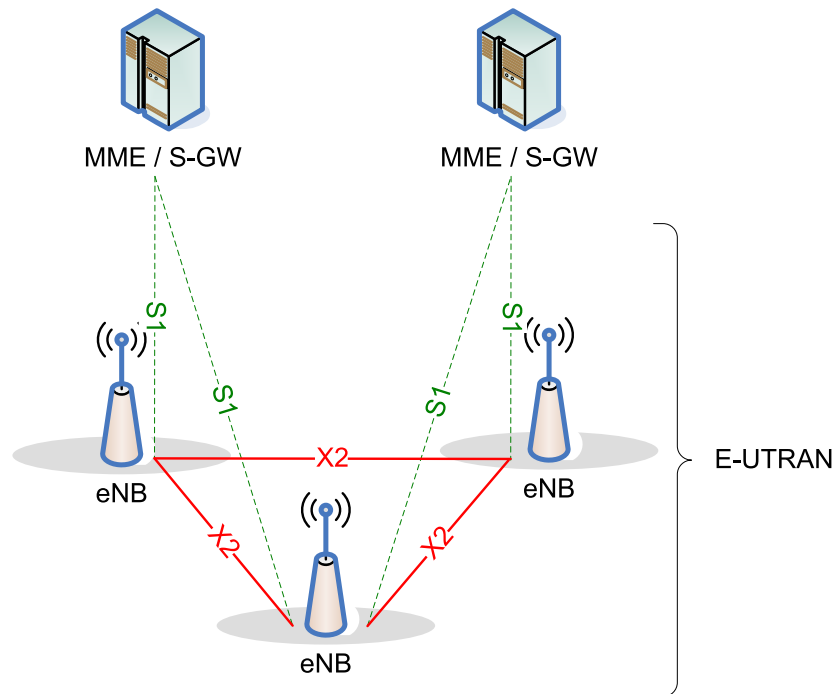


FIGURE 1.3: Architecture du réseau d'accès E-UTRAN [16].

Chaque eNB est connecté au réseau core EPC à travers une d'interface appelée S1. Ce lien se compose de deux interfaces : la première interface S1-Usager (S1-U) permet de connecter l'eNB et le S-GW. En effet, l'eNB achemine les données du plan usager vers le S-GW. Au niveau du plan de signalisation, la deuxième interface S1-MME assure la connectivité entre l'eNB et le MME [16, 17].

D'autre part, une nouvelle interface, appelée interface X2, a été introduite entre les eNBs adjacents. Cette interface permet de minimiser la perte de paquets lors de la mobilité de l'utilisateur en mode handover. En effet, lors d'un processus de handover, de nouvelles ressources radio sont allouées au nouvel eNB pour l'UE en déplacement. Cependant, le réseau continue à transférer les paquets entrants vers l'ancien eNB jusqu'à ce que le nouveau eNB informe le réseau de lui relayer les paquets de l'utilisateur. L'ancien eNB relaie les paquets de données vers le nouvel eNB à travers l'interface X2 [17].

Afin de satisfaire à l'évolution de la demande des services de communication sans fil, le système LTE a subi des améliorations majeures et un nouveau système dit 4G a été développé par le groupe 3GPP. On étudie dans la section suivante ce système, appelé LTE-Advanced.

1.3 Le système LTE-Advanced

Le système LTE-Advanced, nommé aussi 3GPP LTE version 10, est une amélioration du système LTE. En effet, le groupe 3GPP a introduit des améliorations sur le système LTE pour se conformer aux exigences des systèmes IMT-Advanced. En effet, le terme IMT-Advanced a été adopté pour désigner les systèmes de communication mobile qui incluent de nouvelles capacités, dépassant celles de la technologie IMT-2000 [52]. En outre, l'ITU définit la technologie IMT-

Advanced comme étant « une plate-forme mondiale qui servira de base aux prochaines générations de services mobiles - accès rapide aux données, messagerie unifiée et multimédia large bande - sous forme de nouveaux services interactifs captivants ».

Le groupe 3GPP a intégré dans le system LTE-Advanced de nouvelles techniques et améliorations afin de s'aligner avec les spécifications des systèmes IMT-Advanced, entre autres des techniques évoluées de transmission multi-antennes [52, 58].

1.3.1 Les spécifications du système IMT-Advanced

Dans le cadre de la spécification des systèmes IMT-Advanced, l'ITU a défini différentes exigences et fonctionnalités précisées dans la recommandation UIT-R Recommandation M1645 intitulée "Cadre et objectifs d'ensemble du développement futur des IMT-2000 et des systèmes postérieurs aux IMT-2000" [45, 51] :

- Une meilleure efficacité spectrale et des pics de débits de donnée élevés.
- L'amélioration des débits de transfert de données pour supporter des services et des applications avancés : les débits établis comme cibles de la recherche atteignent 100 Mb/s en haute mobilité et 1Gb/s en faible mobilité.
- Des latences plus faibles pour permettre de nouvelles applications sensibles au délai et en temps réel. Cette diminution de latences englobe les latences d'accès au lien radio, latence de handover,...
- Un meilleur soutien de la mobilité des utilisateurs : les systèmes IMT-Advanced, tout comme les autres systèmes cellulaires, doivent assurer toujours leurs services dans divers scénarios de mobilité tels que :
 1. fixe : applications fixes ;
 2. piéton : vitesse moins 10 Km/h ;
 3. véhicule typique : véhicule à vitesse allant jusqu'à 120 Km/h ;
 4. véhicule à haute vitesse : véhicule à vitesse allant jusqu'à 500 Km/h ;
 5. des performances optimisées du système pour les environnements à faible mobilité ;
 6. capacité d'itinérance mondiale : assurer la connectivité des applications sans coupure à d'autres réseaux mobiles et d'autres réseaux IP ;
- La prise en charge des tailles plus grandes des cellules et amélioration de la performance aux bords des cellules.
- Des terminaux à faible coût et faible complexité pour une utilisation dans le monde entier.
- Une interface utilisateur mobile.
- Un accès universel.
- L'amélioration des services de diffusion unicast et multicast.

Les systèmes IMT-Advanced doivent être développés pour offrir de meilleures performances telles qu'un haut débit de transfert de données, une latence minimale, une meilleure qualité de service, etc...

De plus, les systèmes IMT-Advanced doivent supporter les différents standards et protocoles. Ceci permet d'offrir différents services tels que la vidéo et la vidéo-conférence, la navigation web, et d'autres applications offertes aux particuliers et aux entreprises.

Du point de vue énergétique, ces systèmes doivent être conçus pour assurer une connectivité automatique et transparente pour l'utilisateur entre le terminal mobile et la station de base, tout en préservant l'énergie de la batterie de ce terminal.

Enfin, les systèmes IMT-Advanced doivent travailler dans différents environnements : urbains denses, urbains, semi-urbains, ruraux, intérieurs, extérieurs, piétonniers et véhiculaires. Les systèmes sont ainsi destinés à fournir un accès mobile à large bande sans fil dans une architecture cellulaire (par exemple, cellules macro/micro/pico/femto).

Toutes ces exigences générales sont traduites par plusieurs exigences techniques telles que, les méthodes d'accès multiples, le schéma de modulation, la bande passante du système, la structure du canal physique et le multiplexage, l'adaptation et le contrôle de puissance du lien, la latence, la qualité de service, l'aspect de la sécurité, la topologie du réseau, etc [45, 46, 47].....

1.3.2 Les caractéristiques du système LTE-Advanced

Le système LTE-Advanced a été retenu par l'organisation ITU comme étant un système IMT-Advanced, nommé aussi système 4G. En effet, le groupe 3GPP a annoncé le standard LTE-Advanced en Mars 2011, en répondant et même dépassant les spécifications de la recommandation UIT-R Recommandation M1645.

En outre, le standard LTE-Advanced offre les améliorations suivantes par rapport à son prédécesseur LTE [18, 19] :

- Un pic du débit de téléchargement DL jusqu'à 1 Gbps atteint à travers une transmission MIMO 4x4 et une largeur de bande supérieure à 70 MHz.
- Un pic du débit de téléchargement UL jusqu'à 500 Mbps.
- Un pic d'efficacité spectrale égale à 30 bps/Hz en DL et atteignant 15 bps/Hz en UL.
- Une mobilité avec différentes vitesses pouvant atteindre 350 Km/h.
- Une allocation spectrale de différentes tailles incluant une allocation spectrale plus large (jusqu'à 100 MHz) afin d'atteindre des pics importants de débit.
- Des bandes de fréquence additionnelles : 450–470 MHz, 698–862 MHz, 790–862 MHz, 2.3–2.4 GHz, 3.4–4.2 GHz et 4.4–4.99 GHz.
- L'augmentation de la capacité de fournir le service VoIP pour plus d'utilisateurs.
- L'augmentation du nombre d'utilisateurs simultanément connectés.
- L'amélioration de la performance aux bords de la cellule.

Le tableau suivant résume les caractéristiques offertes par le système LTE-Advanced comparées aux spécifications exigées par la recommandation UIT-R Recommandation M1645.

Indicateurs de performance	Recommandation ITU		LTE Release 10 (LTE-Advanced)	
Pic de débit (Mb/s)	DL	1000	DL	1000
	UL	500	UL	500
Pic d'efficacité spectrale (bps/Hz)	DL	15	DL	jusqu'à 30
	UL	15	UL	jusqu'à 15
Latence du plan usager (ms)	≤ 5		≤ 5	
Latence du plan de contrôle (ms)	≤ 100		≤ 50	
Capacité VoIP	jusqu'à 50		jusqu'à 140	

TABLE 1.2: Caractéristiques du système LTE-Advanced.

Afin d'atteindre ces performances, le groupe 3GPP a intégré de nouvelles technologies et techniques de transmission au système LTE version 8. Nous détaillons dans le paragraphe suivant les technologies clés de LTE-Advanced.

1.3.3 Les technologies clés de LTE-Advanced

Afin d'atteindre les spécifications exigées par la recommandation UIT-R Recommandation M1645, de nouvelles techniques ont été intégrées dans le système LTE-Advanced, et d'autres ont été améliorées. Parmi ces techniques on cite : l'agrégation de sous-porteuses, la transmission multi-antenne améliorée, les nœuds de relai, l'amélioration de l'auto-optimisation du réseau, le support des réseaux hétérogènes (HetNet), ainsi que l'amélioration de la mobilité de la station HeNB.

1.3.3.1 L'agrégation de sous-porteuses

Le système LTE-Advanced vise à offrir des débits de transmission plus importants que ceux offerts par le système LTE. Cependant, malgré l'amélioration de l'efficacité spectrale, il est encore difficile d'atteindre ces niveaux de débit.

Afin d'atteindre cet objectif, il était nécessaire d'augmenter les largeurs de bande de la transmission au-delà de celles supportées par une seule sous-porteuse. La solution proposée, appelée agrégation de sous-porteuses (CA), consiste à utiliser plus qu'une sous-porteuse pour la transmission, ce qui augmente par la suite la largeur de bande de la transmission [18]. Ces sous-porteuses, appelées aussi canaux, peuvent être contigües et appartenant à une même bande de fréquence, comme elles peuvent appartenir à différentes bandes de fréquence.

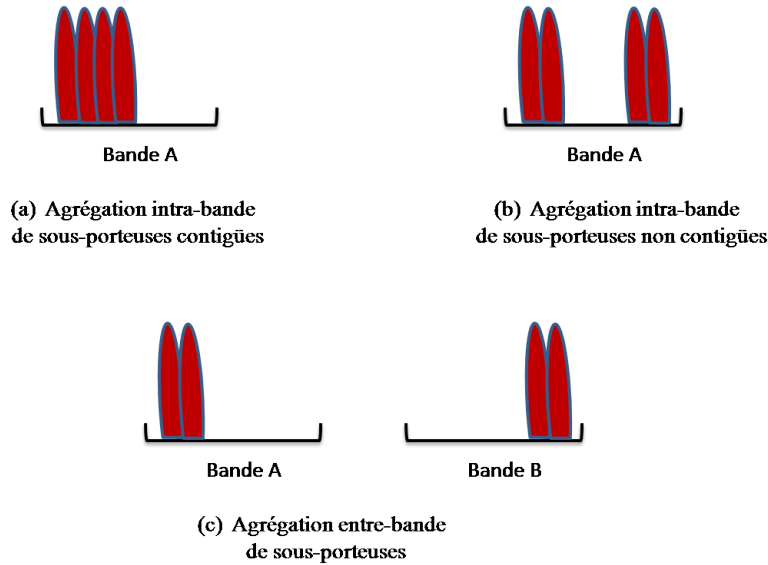


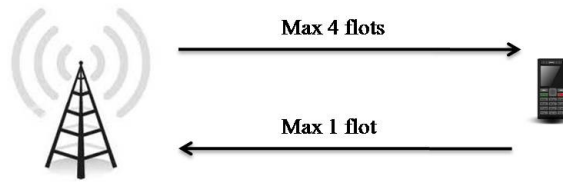
FIGURE 1.4: Agrégation de sous-porteuses.

La technique d'agrégation de sous-porteuses est supportée par les deux formats de LTE-Advanced, le duplex par séparation fréquentielle (FDD) et le duplex par séparation temporelle (TDD). De ce fait, ces deux formats sont capables d'atteindre les spécifications exigées par LTE-Advanced en termes de débit de transmission.

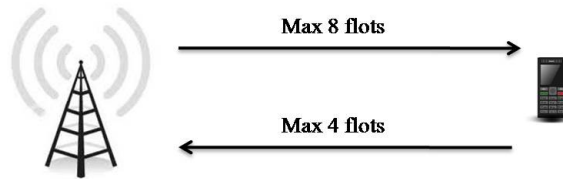
1.3.3.2 Transmission multi-antennes améliorée

Pour atteindre le taux défini par les exigences des systèmes IMT-Advanced, le système LTE-Advanced exploite le multiplexage spatial de plusieurs flots de données pour un seul mobile. LTE-Advanced supporte les techniques de multiplexage spatial MIMO avancées, soit $\{2,4\} \times \{2,4\}$, pour les deux liens UL et DL. Le nombre d'antennes de transmission dans une station de base est définie pour 1, 2 ou 4. Tandis que le nombre d'antennes de réception défini pour le mobile est soit 2, soit 4 [38].

De plus, LTE-Advanced étend la capacité de multiplexage spatial supportée par LTE version 8 aux deux liens DL et UL. En effet, LTE-Advanced est capable d'offrir jusqu'à 8 flots de transmission en DL et jusqu'à 4 flots de transmission en UL [18, 67].



(a) Nombre maximal de flots pour LTE version 8



(b) Nombre maximal de flots pour LTE-Advanced

FIGURE 1.5: Nombre maximal de flots pour les deux systèmes LTE version 8 et LTE-Advanced.

En outre, en plus des techniques MIMO déployées pour un seul usager, la technique MIMO multi-usager est supportée par LTE-Advanced. En fait, ces techniques permettent de transmettre différents flots de données à différents mobiles sur les mêmes ressources de cette région à travers la technique d'accès multiple à répartition dans l'espace SDMA.

En plus, pour les canaux de contrôle, les schémas de diversité de transmission en boucle ouverte sont adoptés, tels que la diversité par décalage cyclique ou encore le codage en blocs espace-temps.

D'autre part, LTE-Advanced adopte les opérations MIMO en boucle fermée visant les canaux de données partagées. Des opérations de collecte d'informations de canal et précodage de ces informations sont nécessaires.

1.3.3.3 Les nœuds de relai

Le relai est une des fonctionnalités proposées pour les systèmes IMT-Advanced. Afin d'améliorer la couverture ainsi que la capacité du réseau en environnement urbain ou résidentiel, couvrir des zones sans couverture ou étendre la couverture dans les zones rurales. Le nœud de relai, dans son rôle de base, reçoit, amplifie et ensuite retransmet les signaux UL et DL.

Le nœud de relai (RN) est connecté au réseau d'accès E-UTRAN à travers une connexion sans fil à une station de base eNB, appelée nœud donneur (DeNB).

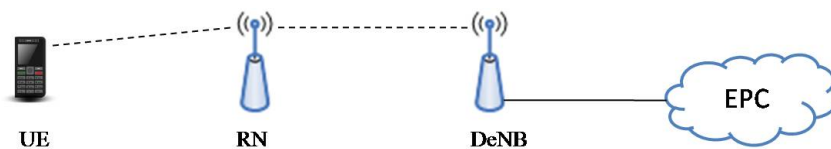


FIGURE 1.6: Le nœud de relai dans LTE-Advanced

Dans le standard LTE version 10, le nœud RN se connecte au nœud DeNB en deux modes :

- Le mode in-band : dans ce mode, le lien RN-DeNB partage les mêmes ressources radios que le lien RN-UE.
- Le mode out-band : contrairement au mode in-band, le lien RN-DeNB n'utilise pas la même sous-porteuse que le lien RN-UE.

1.3.3.4 Auto-optimisation du réseau améliorée

La majorité des réseaux de communication actuels sont dotés d'une architecture centralisée. Cette architecture rend l'ajout de nouvelles cellules une tâche complexe et économiquement chère. Afin de surpasser ces problèmes, de nouvelles fonctionnalités d'auto-configuration et d'auto-optimisation du réseau (SON) ont été introduites dans la version 8 de LTE et ses successeurs.

Dans LTE version 10, la fonction SON a été améliorée afin de simplifier le déploiement de nouveaux nœuds ou d'assurer une meilleure gestion du réseau.

La fonctionnalité SON se compose principalement de trois procédures :

- **L'auto-configuration** : cette fonction permet à une nouvelle cellule telle qu'une cellule femto de configurer les paramètres de démarrage et d'insertion de cette cellule dans le réseau. L'auto-configuration permet donc de choisir, entre autres, l'identité physique de la cellule, ses paramètres RF ainsi que ses paramètres de handover. Cette configuration est effectuée en téléchargeant une configuration par défaut fournie par l'opérateur, ou bien en échangeant les informations avec les nœuds voisins.
- **L'auto-optimisation** : après avoir réussi à s'intégrer dans le réseau, la nouvelle cellule ainsi que les cellules voisines qui subiront l'impact de cette mise à jour du réseau, procèdent à une auto-optimisation de leurs paramètres de fonctionnement afin d'améliorer la performance du réseau. Cette fonction est assurée en se basant sur les rapports de mesure échangés avec les usagers et les nœuds voisins.
- **L'auto-guérison** : cette fonction assure le processus de restauration après un incident qui affecte le fonctionnement du réseau, tels qu'un changement brusque d'interférence ou la détection de scénario dit scénario de « ping pong » dans lequel un UE bascule continuellement entre deux cellules.

1.3.3.5 Support des réseaux HetNet

Le système LTE version 10 adopte le déploiement des réseaux hétérogènes (HetNet) qui combinent des cellules à faible puissance de transmission et à couverture étroite (telles que les cellules femtos et picos, les répéteurs et les nœuds de relai) avec la couche de cellules macros. Les scénarios de déploiement sous évaluation sont détaillés dans le rapport technique TR 36.814 Annexe A [13].

Comme le réseau devient de plus en plus complexe en supportant les réseaux HetNet, le problème de gestion de ressources radios est devenu plus crucial. En effet, des travaux sont en cours de développement tels que des méthodes avancées de gestion de ressources radios et l'amélioration des fonctionnalités SON discutées auparavant. La version 10 de LTE continue à développer le déploiement des stations de base des cellules femtos (HeNB) comme étant un moyen pour améliorer les performances du réseau et réduire le coût des infrastructures.

1.3.3.6 Amélioration de la mobilité du HeNB

Le groupe 3GPP a travaillé pour introduire le concept de cellule femto depuis le système UMTS. Ces travaux ont été étendus dans le système LTE dans sa version 8 et les versions qui la succèdent. De ce fait, des cellules caractérisées par une couverture étroite et une faible puissance de transmission, dites HeNBs, ont été introduites. La version 9 de LTE a spécifié la mobilité « inbound » de la cellule macro au HeNB. Dans LTE-Advanced, de nouvelles améliorations ont été effectuées telles que la gestion de mobilité HeNB-HeNB. Cette fonctionnalité est considérée très importante dans le déploiement de cellules femtos dans un environnement d'entreprise.

Le concept de déploiement de cellule HeNB est différent de celui des nœuds de relai. En effet, le nœud HeNB est connecté au réseau core à travers une connexion internet fixe, telles qu'une connexion ADSL, câble, fibre optique,...

En conclusion, face à l'évolution continue des demandes des usagers, de nouvelles technologies et améliorations ont été introduites afin de satisfaire aux spécifications des systèmes IMT-Advanced, dans le système LTE-Advanced. Parmi ces technologies, on trouve le support des réseaux HetNet, qui déploient différents types de cellules afin d'étendre la couverture du réseau et d'améliorer la qualité de service offerte aux usagers. Dans la section suivante, on détaille le concept de réseau HetNet, ainsi que celui de cellules femtos.

1.4 Le réseau HetNet LTE

Le réseau HetNet est un moyen attractif pour augmenter la capacité des systèmes de communication sans fil. Il est typiquement composé de diverses technologies d'accès radio, architectures, solutions de transmission et stations de base caractérisées par des puissances de transmission différentes [61].

On distingue trois types de stations de base composant un réseau HetNet LTE : la cellule macro, la cellule pico et la cellule femto.

1.4.1 La cellule macro

La cellule macro du réseau HetNet est une cellule dotée d'une couverture large, allant de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres. Cette couverture est assurée à travers des antennes à forte puissance de transmission de l'ordre de quelques dizaines de watt.

Dans le réseau HetNet LTE, la cellule macro n'est autre que le nœud eNB, présenté auparavant. Il assure à travers ses antennes sectorielles la communication avec les usagers et les autres composants du réseau.

1.4.2 La cellule pico

La cellule pico est une cellule mise en place afin de servir des hotspots dans une cellule macro tout en minimisant l'interférence entre ces deux cellules. La couverture de la cellule pico est caractérisée d'un rayon 10 fois inférieur à celle de la cellule macro [25].

Cette cellule opère à une puissance de transmission plus faible que celui de la cellule eNB. Cependant, elle a les mêmes fonctionnalités que le nœud eNB, et requière aussi une installation effectuée par l'opérateur.

1.4.3 La cellule femto

La cellule femto est conçue pour servir un nombre limité d'utilisateurs dans un environnement résidentiel ou une petite entreprise. Le point d'accès femto est donc installé dans une résidence afin de renforcer le signal du réseau dans cette région locale. Ce nœud est connecté au réseau core du système LTE à travers une connexion de données fixe, telle qu'une connexion ADSL, câble ou fibre optique...

Ce nouveau point d'accès, facile à installer par l'abonné, est plus avantageux que les autres cellules micros. En effet, les cellules picos sont installées et maintenues par l'opérateur, alors que les cellules femtos sont installées aisément par l'abonné lui-même, et entretenues à travers la fonctionnalité d'auto-optimisation (SON). De plus, les cellules femtos permettent d'améliorer la qualité du signal dans les résidences à faible couverture et augmenter le débit de connectivité offert au client. En outre, le coût des cellules femtos est nettement inférieur que celui des cellules macros ou picos.

Par conséquent, les travaux de recherche se multiplient dans le but d'étudier l'intégration des cellules femtos dans le réseau HetNet LTE et résoudre les problèmes techniques que génère l'ajout de cette nouvelle couche de cellules.

De ce fait, on s'intéresse dans notre travail au concept des cellules femtos, et on considère par la suite durant tous nos travaux que le réseau HetNet LTE est composé de deux couches de cellules : une première couche de cellules macros, et une deuxième couche de cellules femtos.

Dans le reste de ce chapitre, on détaille les cellules femtos, leur architecture, leurs mode de fonctionnement ainsi que leur intégration dans le système LTE. On évalue ensuite l'impact de l'ajout de cette couche de cellules sur la performance du réseau.

1.5 Le concept de cellule femto

1.5.1 Définition

Une cellule femto est définie comme étant « l'élément de base du système cellulaire de téléphonie mobile à faible puissance, prévue pour offrir une couverture radio limitée et souvent dédiée à un usage résidentiel ou dans une entreprise » [69]. La cellule femto est donc une station de base miniature, à faible puissance, et permet de connecter un équipement mobile au réseau de l'opérateur en exploitant une connexion Internet fixe tierce [37]. La cellule femto permet ainsi de converger les réseaux fixes et mobiles.

La cellule femto vient pour répondre aux besoins et tendances des usagers qui utilisent souvent leurs mobiles dans leurs résidences, même avec la présence d'un téléphone fixe. En effet, les consommateurs utilisent leurs équipements mobiles plus souvent que leurs téléphones fixes. En outre, la liste des contacts et la boîte de réception des messages sont enregistrée majoritairement sur ces mobiles.

Les stations de base des cellules femtos actuellement développées prennent en charge généralement les accès pour les téléphones de 3^{ème} génération (3G) tels que Universal Mobile Telecommunications System (UMTS), Code Division Multiple Access (CDMA), Wideband Code Division Multiple Access (WCDMA) et aussi 3G+ High Speed Downlink Packet Access (HSDPA). Cependant, celles qui supportent les systèmes 4G sont encore en cours de développement [69].

1.5.2 Avantages

Le concept de cellule femto présente des avantages et des profits tant pour le consommateur que pour l'opérateur.

En effet, l'installation d'une cellule femto dans sa résidence ou son entreprise permet au consommateur de :

- Renforcer le signal en absence ou à faible couverture.
- Augmenter la capacité de transfert de données.
- Bénéficier des politiques de tarification forfaitaire pour la connexion au réseau de l'opérateur et la connexion IP fixe. Ceci offre au client une réduction des frais des appels émis à travers la cellule femto.
- Remplacer les téléphones DECT ou filaires de l'employé et lui offrir un seul téléphone mobile qui englobe une seule liste de contacts et une seule boîte de réception des messages.
- Offrir une utilisation simple et installation plug-and-play facile.

Par conséquent, le déploiement de la cellule femto augmente la satisfaction du client. Elle permet donc d'améliorer l'expérience utilisateur à la maison ou à l'entreprise. Ceci permet à l'opérateur de :

- Réduire le taux de désabonnement, suite à des réclamations de mauvaise couverture, en offrant une meilleure qualité de lien et des services avancés aux abonnés.
- Gagner d'autres parts du marché et réaliser des gains importants.
- Substituer l'utilisation des fréquences non licenciées par d'autres licenciées.
- Diminuer la puissance : environ de 8 à 12 mW moins que celle des points d'accès Wifi [65].
- Assurer l'inter-opérabilité et la compatibilité avec les systèmes de communication mobile (UMTS, WIMAX, LTE,...) et les connexions Internet (DSL, Cable, Fiber).

1.5.3 Fonctionnement

Le service de la cellule femto est vendu par l'opérateur de communication mobile à ses abonnés, résidentiels ou professionnels.

Un point d'accès est donc fourni au client, lui permettant d'une part de mettre en place une petite cellule de la taille d'une résidence. D'autre part, ce boîtier se connecte au réseau de l'opérateur à travers le routeur d'une connexion IP fixe (ADSL, câble, fibre optique).

La mise en marché de la cellule femto est très facile. En effet, un simple « plug and play » permet de déployer la cellule. Ensuite, le client doit déclarer, à travers une interface web simplifiée, le nombre maximal de téléphones autorisés à se connecter à la cellule. Ce nombre varie de 2 à 4 dans un environnement résidentiel et s'étend à 16 équipements dans une entreprise [69]. Une procédure de sécurité permet de restreindre l'accès à la cellule femto exclusivement aux mobiles autorisés.

Une fois couvert par sa zone de couverture, le mobile bascule automatiquement et communique avec la station de base de la cellule femto au lieu de la cellule macro. Ce processus appelé « Handover » est effectué d'une façon transparente par rapport à l'utilisateur, même lors d'une communication vocale. Réciproquement, un handover vers la cellule ayant la meilleure qualité de lien radio sera déclenché automatiquement.

1.5.4 Architecture

L'architecture du déploiement d'une cellule femto comporte 3 entités principales qui communiquent entre elles.

La première entité n'est autre que le point d'accès de cette cellule. En effet, le fonctionnement de cette station de base locale est globalement semblable à la station de base de la cellule macro, avec quelques fonctionnalités réseaux avancées ajoutées.

Le deuxième composant du système est une passerelle de la cellule femto. Cette passerelle assure l'agrégation et la validation du trafic de signalisation entre les différentes cellules femtos. Elle gère aussi l'authentification entre ces cellules femtos, ainsi que la sécurisation de la communication entre elles.

Une troisième entité, appelée système de gestion, assure la distribution des mises à jour des logiciels utilisés par les stations de base. Ce système se charge aussi d'effectuer les diagnostics de vérification, en utilisant le protocole de gestion TR.069 [36].

1.5.5 Défis et problèmes

Le déploiement de cellules femtos dans un environnement résidentiel ou professionnel doit faire face à plusieurs défis techniques, juridiques et économiques. Certains de ces problèmes d'intégration sont discutés dans ce paragraphe.

1.5.5.1 La précision du spectre

Afin de respecter les exigences de la Commission Fédérale de Communication (FCC), la cellule femto doit générer un signal à haut degré de précision. Ceci nécessite des techniques avancées. Une solution proposée est d'utiliser un signal précis pour calibrer constamment l'oscillateur. D'autres solutions de synchronisation telles que IEEE1588 [57] et le protocole Network Time Protocol (NTP) [35] peuvent être déployées pour remédier à ce problème.

1.5.5.2 La qualité de service

La cellule femto est basée sur la connexion IP qui permet de transférer les données provenant du UE à travers le point d'accès vers le réseau de l'opérateur. Cette connexion peut être une liaison ADSL, une liaison par câble, etc. . .

Cependant, ce point d'accès partage la bande passante avec d'autres services desservis par la même connexion, tels que la consultation de pages webs, des jeux vidéos, TV sur IP, téléchargement de films, . . . Par conséquent, ce trafic peut affecter la qualité de service de la communication à travers la cellule femto, notamment pour le service de téléphonie qui est très exigeant en termes de délai.

De plus, cette qualité de service dépend aussi du réseau de l'opérateur lui-même.

1.5.5.3 L'emplacement et la localisation de l'équipement

Le point d'accès de la cellule femto est un équipement portable et peut être déplacé d'un endroit à un autre, voire même d'un pays à un autre. Ce pays n'autorise pas forcément le fonctionnement de cet équipement dans son territoire. L'opérateur doit donc mettre à jour constamment la localisation de cet équipement.

Une solution pour remédier à ce problème consiste à effectuer un suivi par le système Global Positioning System (GPS). Cependant, cette solution reste non efficace spécifiquement dans des emplacements à faible signal GPS.

1.5.5.4 L'interférence

Les cellules femtos utilisent la même bande de fréquence que celle des cellules macros. Ceci peut être la source d'interférence dégradant la qualité du lien radio.

Pour surpasser ce problème, des techniques appropriées sont intégrées dans la station de base de la cellule femto. On cite comme exemples de ces techniques la détection des macros cellules, le contrôle de puissance et les séquences de codes de brouillage. De nouveaux travaux de recherche sont en cours afin de résoudre le problème d'interférence. Des solutions sont proposées afin d'annuler cette interférence, alors que d'autres travaux tentent de bien la gérer et minimiser son impact sur la performance du réseau.

Nous proposons dans nos travaux de recherche une stratégie d'annulation d'interférence du lien DL dans un réseau HetNet LTE composé de cellules macros et de cellules femtos. Cette stratégie développée est étudiée dans le dernier chapitre de ce document.

1.6 Les cellules femtos dans le réseau HetNet LTE

1.6.1 Architecture

Dans la terminologie 3GPP, la station de base d'une cellule femto est appelée Home Node B (HNB) pour le système HSPA, et Home enhanced Node B (HeNB) pour le système LTE [62]. En effet, le sous-système HeNBS se compose d'une station HeNB et optionnellement d'une passerelle HeNB GW [21]. HeNB est un équipement local pour l'utilisateur ; en fait, il est hébergé chez le consommateur et offre l'interface LTE-Uu à l'équipement de l'utilisateur (UE).

Le sous-système HeNBS se connecte au système EPC à travers l'interface standard S1. Plus spécifiquement, le HeNB communique avec l'entité de gestion de la mobilité MME à travers l'interface S1-MME [21]. De même, le HeNB se connecte à la passerelle de service S-GW à travers l'interface S1-U [21]. La figure suivante résume les connexions entre ces différentes entités.

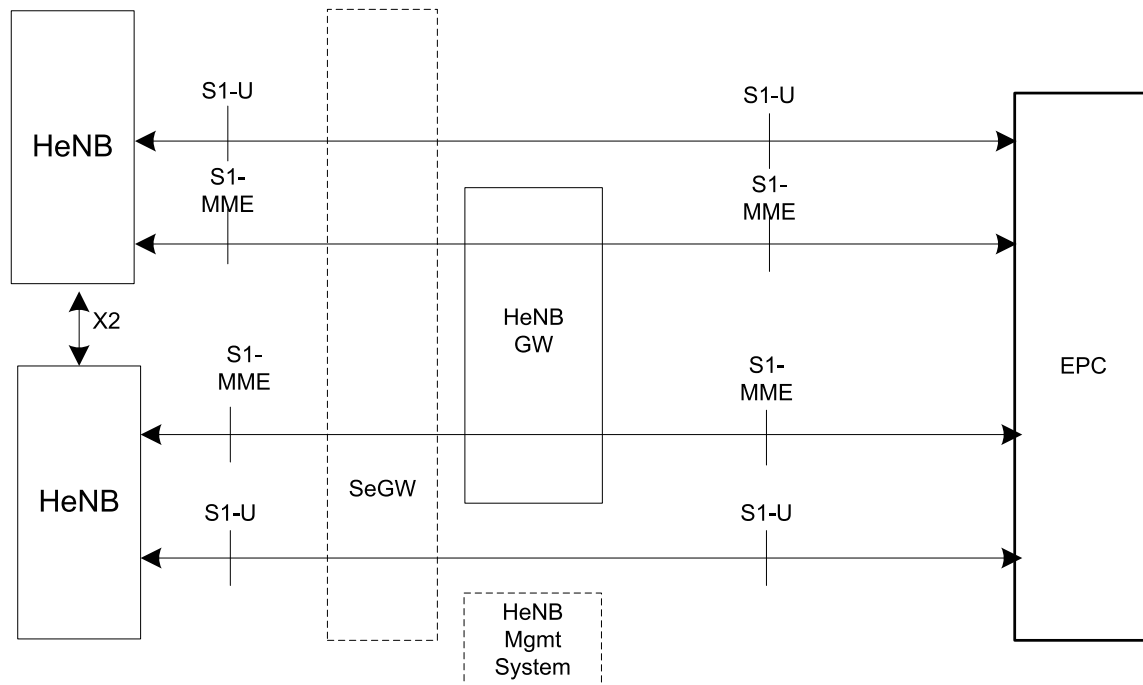


FIGURE 1.7: Architecture logique HeNB E-UTRAN [9].

On détaille dans ce qui suit les fonctionnalités des différentes entités présentées dans la figure ci-dessus.

1.6.1.1 L'entité HeNB

HeNB possède les mêmes fonctionnalités qu'une station de base d'une cellule macro eNB, en plus de quelques spécifications additionnelles en cas de connexion avec un HeNB GW. De même, les procédures se déroulant entre un HeNB et EPC doivent se dérouler similairement à celles se déroulant entre un eNB et EPC, avec des exceptions mineures. Les fonctions principales de base du HeNB se résument globalement en [9] :

- La gestion des ressources radios : tel que le contrôle d'admission radio, contrôle de mobilité, l'allocation dynamique des ressources aux UEs sur les deux liens UL et DL.
- La compression et cryptage de l'entête IP du flux de données.
- La sélection d'une MME lors de l'attachement d'un UE, si aucune MME n'est spécifiée par la configuration fournie à cet UE.
- L'acheminement des données de l'utilisateur vers la passerelle S-GW.
- L'ordonnancement et la transmission des messages de pagination provenant de la MME.
- La configuration des rapports de mesure de mobilité et d'ordonnancement.

Si le HeNB est associé à un HeNB GW, des spécifications sont ajoutées aux fonctionnalités ci-dessus. Parmi ces spécifications on cite :

- La découverte du HeNB GW approprié.
- Une fois connecté à un HeNB GW, le HeNB ne peut pas se connecter à un autre HeNB GW ou un autre MME.

- L'indicatif régional de suivi (TAC) et l'identifiant du réseau mobile terrestre public (PLMN ID) utilisés par le HeNB doivent être supportés par le HeNB GW.
- Lorsque le HeNB est connecté à un HeNB GW, la sélection d'une MME lors de l'attachement du UE est effectuée par le HeNB GW au lieu du HeNB.

1.6.1.2 L'entité HeNB GW

Le HeNB GW est une entité intermédiaire qui gère le dialogue entre la MME et le HeNB qui servent l'UE. En effet, le HeNB GW paraît à MME comme étant un eNB, et paraît au HeNB comme étant une MME. Le HeNB GW permet aussi de déterminer, entre autres, le TAC et PLMN ID pour le HeNB. L'avantage principal du HeNB GW est qu'il peut desservir plus qu'un seul HeNB simultanément.

1.6.1.3 Les interfaces

L'architecture du système LTE, de même pour LTE-Advanced, est une architecture tout IP qui se sépare entre deux plans : le plan de trafic de l'utilisateur et le plan de trafic de contrôle. La figure 1.8 suivante représente le schéma de l'architecture d'ensemble du réseau E-UTRAN du réseau HetNet LTE.

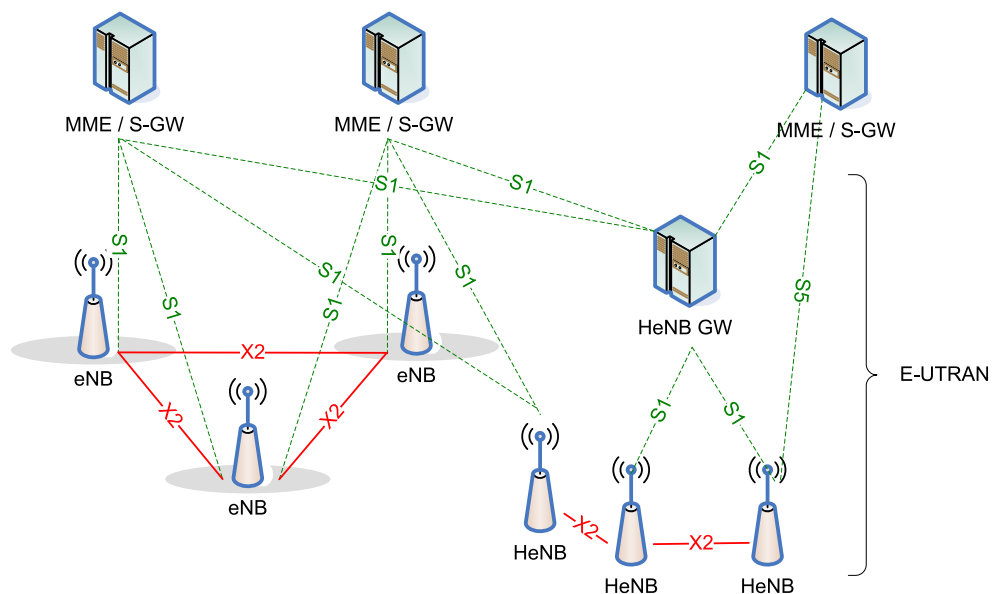


FIGURE 1.8: Architecture d'ensemble du E-UTRAN du réseau HetNet LTE [9].

Les entités détaillées auparavant communiquent entre elles à travers les différentes interfaces décrites ci-dessous :

- **Interface S1** : cette interface permet de connecter le HeNB directement à une MME. Dans certains cas, un HeNB GW est inséré à l'intermédiaire de cette connexion à travers la même interface S1. Elle permet donc de connecter le HeNB au HeNB GW correspondant et par la suite connecter cette passerelle au MME correspondant. L'interface S1 peut également connecter un nœud eNB au réseau core.

- **Interface X2** : cette interface permet d'assurer le handover entre les HeNBs. Ceci est valable même pour un handover entre un HeNB en liaison directe au réseau core et un autre HeNB connecté au réseau core à travers un HeNB GW. Il est à noter que l'interface X2 ne peut pas connecter un HeNB GW avec n'importe quel autre nœud.
- **Interface S5** : cette interface sert à connecter directement un HeNB qui supporte la fonctionnalité Local IP Access (LIPA) au réseau core. Cette fonctionnalité consiste à permettre à un équipement IP autorisé d'accéder à une cellule femto locale d'un consommateur, voire même sa connexion Internet fixe, tout en utilisant l'interface radio de cette cellule femto [71, 50]. C'est une connexion au réseau local à partir du réseau extérieur de l'opérateur.

1.6.2 Fonctionnement

Pour assurer le bon fonctionnement du réseau de l'opérateur, le HeNB ne doit en aucun cas affecter le fonctionnement de la cellule macro et sa station de base eNB. Il doit aussi minimiser la surcharge due à l'enregistrement du mobile de l'utilisateur à la cellule femto, et également la cellule macro. De même, la capacité des nœuds déjà existantes ne doit pas être affectée par l'ajout d'une cellule femto au réseau de l'opérateur. En outre, la connexion à une cellule femto d'un consommateur spécifique ne doit être offerte que pour les mobiles autorisés.

Pour assurer ces objectifs, plusieurs techniques et mécanismes ont été mis en place au sein de la technologie de cellule femto. Dans ce qui suit, on va discuter et détailler certaines de ces fonctionnalités.

1.6.2.1 Le contrôle d'accès

Le HeNB offre la possibilité de restreindre l'accès à la cellule femto pour un groupe de mobiles autorisés. Ceci est assuré à travers le concept Closed Subscriber Group (CSG).

En effet, le nœud HeNB supporte 3 modes d'accès [48] :

- **L'accès fermé ou « closed access »** : dans ce mode, le service est offert seulement pour les membres du groupe CSG. Ces derniers sont donc des mobiles autorisés par le consommateur à se connecter à travers sa cellule femto.
- **L'accès ouvert ou « open access »** : le mode ouvert offre les services à tout le monde sans restriction. Le HeNB sera donc assimilée à un eNB. Il est utilisé dans des espaces publics pour améliorer la couverture ou la capacité du réseau de l'opérateur. Des exemples typiques de l'utilisation de ce mode sont les cellules femtos déployées dans les gares et les aéroports.
- **L'accès hybride ou « hybrid access »** : dans ce mode, les services sont offerts aux membres du groupe CSG, ainsi que les mobiles non membres de ce groupe, tout en priorisant les membres du groupe CSG. Ce mode peut être utilisé par exemple dans des cliniques ou des centres commerciaux. La connexion à travers la cellule femto est offerte en priorité aux employés et aux personnels. Elle peut être aussi offerte aux clients avec une priorité inférieure.

1.6.2.2 Le contrôle de mobilité

Le contrôle de mobilité du UE est une fonctionnalité principale dans un réseau de communication mobile. En effet, on distingue entre deux types de contrôle de mobilité, selon l'état du UE : contrôle en mode repos ou « idle » et contrôle en mode actif.

- **Le mode idle** : La fonctionnalité de sélection et de re-sélection pour les mobiles membres d'un groupe CSG est une fonction de recherche autonome. Cette fonction détermine elle-même quand et où chercher la cellule femto. Cependant, cette recherche autonome peut exploiter des informations provenant du réseau de l'opérateur, tels que des informations sur les fréquences ou sur les cellules voisines [11].
- **Le mode actif** : Lorsque le mobile de l'utilisateur est actif, il effectue des opérations de mesures et des procédures de contrôle de mobilité basées sur la configuration fournie par le réseau opérateur. On distingue 3 opérations différentes [48] :
 - Inbound Handover : c'est le basculement du UE de la cellule macro à la cellule femto.
 - Outbound Handover : il s'agit d'un basculement de la cellule femto à la cellule macro.
 - Handover entre HeNB : le mobile bascule d'une cellule femto à faible signal ou surchargée vers une cellule femto voisine offrant de meilleures performances. Il est à noter que la cellule femto cible doit être soit en mode « closed access » soit en mode « hybrid access ».

1.6.2.3 Le contrôle d'interférence

Dans le réseau HetNet LTE, l'interférence est un facteur qui nuit à la communication, notamment dans les bordures des cellules. Plusieurs techniques ont été mises en place pour remédier à ce problème, telles que l'annulation, la coordination et la randomisation de l'interférence [48].

Dans le contexte de co-existence des cellules macro et femto, l'interférence co-canal peut avoir lieu dépendant de plusieurs facteurs, tels que la direction du lien radio, la localisation de la cellule femto, la méthode d'accès à la cellule et le mode d'utilisation du canal. En effet, on distingue 3 modes différents :

- Mode co-canal : la cellule macro et la cellule femto se partagent la bande de fréquence entière. Ceci peut engendrer une interférence macro-femto fatale.
- Mode co-canal partiel : la cellule femto se partage quelques plages de fréquence avec la cellule macro. Ce cas aussi peut engendrer une interférence macro-femto fatale.
- Mode canal dédié : les deux cellules, macro et femto, utilisent des bandes de fréquence différentes. Ceci permet de résoudre le problème d'interférence macro-femto. Cependant, il peut causer des interférences femto-femto majeures.

Afin de minimiser l'interférence avec les cellules voisines, la station de base utilise la technique de réutilisation de fréquence. Il s'agit d'utiliser la même fréquence pour différentes cellules tout en respectant les contraintes de minimisation d'interférence et de conservation des ressources. Différentes méthodes d'ordonnancement pour la réallocation de fréquence sont mises en place. Parmi ces méthodes de distribution de fréquence, on cite la réutilisation de fréquences fractionnaire (FFR), la réutilisation souple de fréquences (SFR), la réutilisation partielle de fréquences (PFR).

Le système OFDMA utilise la méthode FFR pour atténuer l'interférence [48]. Il divise les ressources, fréquentielles et temporelles, en différents ensembles. Ces ressources sont réutilisables avec un certain facteur de réutilisation.

D'autre part, le principe de base de SFR consiste à diviser la bande de fréquence entière en 3 groupes. Chaque cellule sélectionne un groupe de fréquence comme étant sa bande majeure. Les autres groupes seront considérés comme étant des bandes mineures. Cette sélection respecte la condition exigeant que la limite supérieure de la puissance de transmission pour la bande majeure soit supérieure à celle des autres bandes mineures. Les bandes majeures seront donc utilisées dans

la zone entière de couverture de la cellule ; tandis que les bandes de fréquence mineures ne seront allouées que pour des utilisateurs proches de la station de base et avec une puissance de transmission limitée.

L'idée de base de la méthode PFR est de diviser la bande de fréquence entière en deux : la première sous-bande, appelée « cell edge band », sera utilisée avec un facteur de réutilisation égal à 1 ; donc elle est entièrement réutilisable. La deuxième sous-bande, dite « cell center band », sera attribuée un facteur de réutilisation égal à 3. Similaire à SFR, les utilisateurs situés à la bordure de la cellule sont autorisés à utiliser uniquement la bande « cell edge band ». Les utilisateurs situés au centre de la cellule utilisent la bande « cell center band ». Ces derniers peuvent aussi utiliser la première bande, mais avec une priorité inférieure à celle accordée aux utilisateurs situés à la bordure de la cellule.

L'ajustement de l'interférence inter-cellules est assuré par le moyen d'échange de messages entre les HeNBs à travers l'interface X2. Ces messages contiennent des informations sur certains indicateurs prédéfinis par les exigences dans 3GPP TS 36.423 [12]. Parmi ces indicateurs, on cite l'indicateur Interference Overload Indicator (IOI), l'indicateur High Interference Indicator (HII) et l'indicateur Relative Narrowband Tx Power (RNTP) . En exploitant les informations provenant de ces indicateurs sur les états des cellules voisins, une cellule femto peut donc déterminer la plage de fréquence source d'interférence.

Conclusion

Le réseau HetNet LTE est composé de deux couches de cellules : une couche de cellules macros, et une couche de cellules femtos. Les deux couches coexistent à travers une architecture évoluée et se partagent les ressources afin d'offrir de meilleurs services aux usagers.

Dans le chapitre suivant, on étudie le processus d'intégration d'une cellule femto dans le réseau LTE existant. On analyse aussi l'impact de l'ajout de cette couche de cellules sur la performance du réseau.

Chapitre 2

Etude de performances du réseau HetNet LTE

Introduction

La couche de cellules femtos est intégrée dans le réseau LTE existant afin de résoudre le problème de limite de capacité du réseau, ainsi que pour offrir une meilleure qualité de service aux usagers.

On étudie donc dans ce chapitre comment intégrer une nouvelle cellule femto dans un réseau LTE. On évalue ensuite l'impact de ces nouvelles cellules sur la performance du réseau à travers des simulations au niveau système du réseau HetNet LTE.

2.1 Intégration d'une cellule femto dans le réseau HetNet LTE

La cellule femto est une cellule de petite taille, localisée dans une résidence ou une entreprise. La couverture de cette cellule est assurée par un point d'accès appelé (FAP). Ce FAP est donc un matériel qui doit être installé dans la résidence de l'abonné, raccordé au réseau de l'opérateur à travers une connexion Internet fixe. Cette tâche d'installation doit être faite par le consommateur lui-même, qui est dans la plupart des cas un débutant et ignorant de cette configuration. Par conséquent, l'installation du FAP doit se faire d'une façon automatique et facile pour le consommateur.

Pour répondre à ce besoin, le concept d'auto-organisation est implémenté dans le FAP. En effet, ce concept guide le FAP à s'auto-configurer avec une intervention minimale de l'être humain. De plus, la cellule femto doit optimiser périodiquement ses paramètres pour maintenir sa couverture et améliorer le débit qu'elle offre aux abonnés en fonction de l'état du réseau et de son entourage.

Dans cette section, on va étudier le principe d'auto-configuration d'une cellule femto ainsi que les différentes fonctionnalités implémentées pour assurer une installation simple et transparente vis à vis du client.

2.1.1 Auto-configuration des paramètres d'une cellule femto

Lorsque le client s'abonne au service des cellules femtos d'un opérateur, ce dernier lui offre un point d'accès à installer chez lui.

Une fois en marche, le FAP doit se procurer les informations fondamentales pour son fonctionnement, telles que les fréquences DL et UL, la liste des codes de brouillage, la bande de fréquence du canal radio, etc... Une configuration par défaut fournie par l'opérateur via la connexion fixe facilite la configuration de ces informations.

Ensuite, le FAP configure les autres paramètres réseau pour assurer son intégration dans le réseau. Il sélectionne tout d'abord automatiquement l'identité physique de la cellule si cette dernière n'est pas indiquée par l'opérateur. Après l'identification et l'enregistrement, le FAP configure sa liste de cellules voisines, femtos et macros. De même, la cellule femto configure elle-même ses paramètres de handover, ainsi que ses paramètres RF (pilote, puissance maximale). Ces informations sont automatiquement calculées à partir de la couche de cellules macros et la couche de cellules femtos, et sont envoyées à la cellule femto à travers le lien Internet fixe.

Si le réseau de l'opérateur ne supporte pas cette configuration ou ne peut donner aucune suggestion, la cellule femto doit dériver ses paramètres en utilisant les informations collectées par l'écoute du canal radio. Ceci augmentera par conséquent le délai de la procédure de démarrage et de configuration, et engendre de plus une performance indésirable.

La figure suivante résume la procédure de démarrage et d'intégration de la cellule femto dans le réseau de l'opérateur.

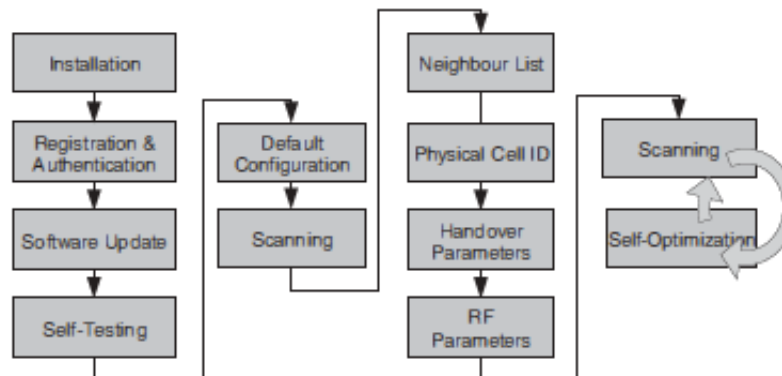


FIGURE 2.1: Procédure de démarrage d'une cellule femto [76].

2.1.1.1 L'identité physique de la cellule femto

Chaque FAP possède une identité de la cellule femto appelée identité physique de la cellule (PCI). Cette PCI est utilisée pour identifier et enregistrer la cellule femto au réseau de l'opérateur. La PCI contribue aussi dans le processus de handover en offrant au UE une liste des PCIs des cellules vers lesquelles il peut basculer.

La PCI peut ne pas être unique dans le réseau de l'opérateur. Cependant, elle doit être unique dans une même zone locale pour éviter la confusion entre les cellules voisines.

Dans le système LTE, 510 signaux de référence sont réservés pour identifier les cellules. Chaque signal référence est divisé en deux séquences à deux dimensions, fréquence et temps. Ces deux séquences sont appelées séquences pseudo-aléatoires et orthogonales. Chaque séquence correspond à un groupe de PCIs. De plus, il existe 3 séquences orthogonales définies au sein de chaque groupe de PCIs, chacune correspondante à une identité unique de cellule. Durant la phase de synchronisation,

l'UE extrait la PCI à partir du signal de synchronisation primaire, ainsi que le numéro du groupe d'identité à partir de la synchronisation secondaire [32].

La PCI est désignée normalement par l'opérateur à travers un outil de planification [5]. Néanmoins, en cas de perte de la PCI ou de détection de confusion, la cellule femto doit être capable d'auto-configurer son PCI lors du processus de démarrage. Deux approches sont proposées :

- Soit l'opérateur configure automatiquement la PCI à travers la connexion Internet fixe ;
- Soit la cellule femto dresse la liste de PCIs de ses cellules voisines en utilisant la fonctionnalité d'écoute du réseau puis la cellule femto choisit aléatoirement un PCI qui n'est pas encore utilisé.

Une fois le FAP est mis en marche, et connecté à Internet via la connexion fixe, la cellule femto tente ensuite de se connecter au réseau de l'opérateur. Elle est alors authentifiée et enregistrée au sein du réseau de l'opérateur comme étant un équipement opérationnel.

2.1.1.2 La liste des cellules voisines

L'UE doit effectuer continuellement des mesures de la force des signaux reçus par les cellules voisines, femtos et macros. En effet, ces mesures contribuent à la mise à jour de la liste des cellules voisines, nécessaire pour la procédure de sélection de la cellule servante quand l'UE est en mode « idle », ou bien pour assurer la procédure de handover quand l'UE est en mode actif.

La cellule femto peut ordonner au UE une liste de cellules voisines dont il doit mesurer la force du signal. l'UE effectue donc les mesures nécessaires et renvoie le résultat à la cellule femto.

La liste des cellules voisines contient donc le PCI de la cellule ainsi que l'indicateur de force de son signal reçu (RSSI) en dB. La figure ci-dessous schématise la liste de cellules voisines d'une cellule femto.

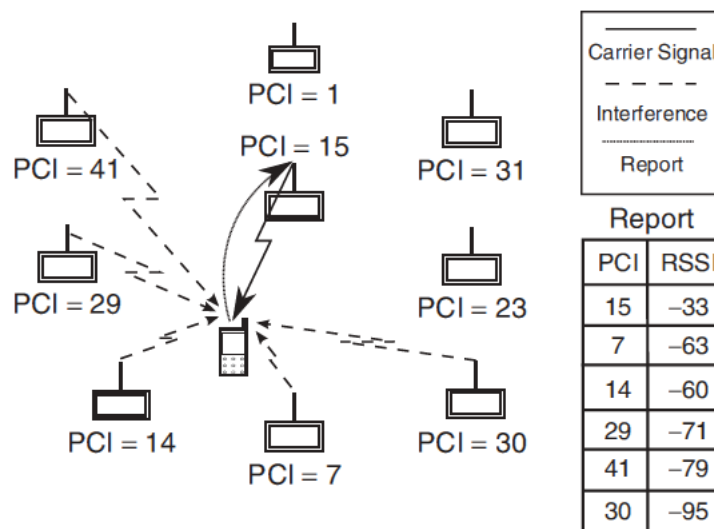


FIGURE 2.2: Rapport de mesure retourné par l'UE à la cellule femto [76].

La cellule femto doit être capable d'inclure une nouvelle cellule qui vient d'apparaître dans sa liste. En effet, la cellule femto exploite sa fonctionnalité d'écoute du réseau ainsi que les rapports de mesure reçus de la part de ses UEs pour détecter la présence d'une nouvelle cellule.

La cellule femto doit être aussi capable d'exclure certaines cellules voisines de sa liste soit pour libérer une entrée si la liste est pleine (32 PCIs maximum), soit pour la remplacer par une nouvelle cellule voisine qui apparaît avec un meilleur RSSI, soit parce que la cellule à exclure est caractérisée par un mauvais RSSI ou un taux de blocage d'appels trop élevé.

De nouveaux algorithmes sont en cours de développement pour automatiser et optimiser la procédure de mise à jour de la liste des cellules voisines [26].

2.1.1.3 Les paramètres RF

Après l'authentification dans le réseau et la création de la liste des cellules voisines, la cellule femto doit auto-configurer ses paramètres RF.

En effet, la cellule femto doit choisir convenablement la fréquence de sa porteuse. Elle doit aussi choisir le meilleur code de brouillage DL optimal, ainsi que les codes des zones de localisation et de routage, LAC et RAC. De même, la cellule femto doit configurer le niveau optimal de la puissance maximale disponible pour la transmission en DL et UL.

2.1.2 Fonctionnalité d'écoute du réseau

La cellule femto opère dans un réseau composé de plusieurs autres cellules voisines, avec lesquelles elle partage les mêmes ressources. Par conséquent, elle doit être constamment au courant de la présence des cellules voisines, de leurs puissances de transmission et de leurs allocations de ressources. Ceci permet de maintenir la couverture de la cellule femto et améliorer la performance du réseau.

Pour accomplir cette tâche d'écoute du réseau, la cellule femto peut avoir recours à plusieurs techniques telles que le mode d'écoute du réseau, l'échange de messages et les rapports de mesure.

2.1.2.1 Le mode d'écoute du réseau

Dans ce mode, la détection est assurée par le point d'accès de la cellule femto considérée. Elle est donc capable de balayer l'interface radio, détecter les cellules voisines et régler ses paramètres réseaux et RF.

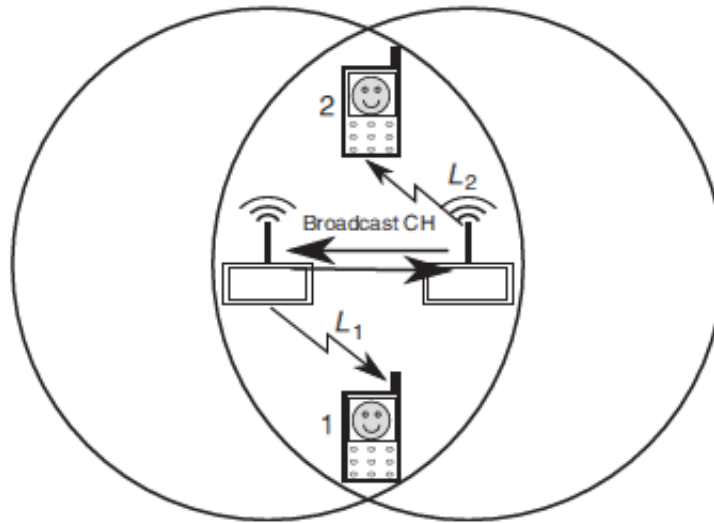


FIGURE 2.3: Fonctionnalité d'écoute du réseau [76].

Cette fonctionnalité, schématisée dans la figure ci-dessus, est essentielle afin d'assurer la tâche d'auto-optimisation des paramètres de la cellule femto. En effet, elle permet de vérifier périodiquement les paramètres du réseau, la synchronisation et les conditions d'interférence. Les informations collectées par l'écoute du réseau peuvent être utilisées dans l'identification des cellules voisines, ainsi que l'opérateur à qui elles appartiennent ; elles permettent aussi de distinguer si elles s'agissent de cellules macros ou femtos et estimer leurs atténuations [15].

2.1.2.2 L'échange de messages

La cellule femto peut diffuser des messages contenant des mesures d'interférence telles que la force du signal et des informations sur l'allocation des sous-canaux. De ce fait, la cellule femto est toujours au courant du comportement de ses voisins, ce qui leur permet de coopérer entre elles.

Les messages sont échangés à travers les interfaces existantes ou à travers d'autres nouvelles interfaces :

- La cellule femto peut échanger ces messages à travers sa passerelle. En effet, la cellule femto source envoie les messages à la passerelle ; ensuite, cette passerelle expédie ces messages aux cellules destinations.
- Une autre solution consiste à créer une nouvelle interface entre les cellules femtos. L'interface X2 définie par LTE assure le transfert de ces messages entre les eNBs.

Ces deux premières fonctionnalités sont limitées par la couverture de la cellule femto. En effet, deux cellules distantes ne pouvant pas se détecter l'une et l'autre, ne peuvent pas par exemple s'informer sur l'allocation des ressources. Par conséquent, un UE se situant sur la zone de chevauchement entre ces deux cellules souffrira de forte interférence due à la non coordination des ressources allouées.

2.1.2.3 Les rapports de mesure

Pour remédier aux limites des deux techniques d'écoute du réseau décrites auparavant, les rapports de mesure (MR) calculés par les UEs et reportés vers la cellule femto peuvent être utilisés.

En effet, une fois connecté à une cellule servante, l'UE envoie périodiquement un rapport sur la qualité du signal à la cellule femto via un MR. Ce dernier inclut aussi des mesures des signaux des cellules voisines. Le MR indique donc l'état du canal à la position de l'utilisation.

Si la qualité du signal est bonne, aucune action n'est prise. Cependant, si le signal est trop faible, la cellule femto peut allouer au UE plus de ressources ou bien initier un handover vers une autre cellule macro ou femto.

2.1.3 Auto-optimisation des paramètres d'une cellule femto

Après le démarrage avec succès de la cellule femto et la configuration de ses paramètres pour assurer son intégration dans le réseau de l'opérateur, la cellule femto doit optimiser constamment ces paramètres pour améliorer sa performance et maintenir sa couverture.

En effet, le FAP exploite les fonctionnalités d'écoute du réseau pour mesurer l'interférence du réseau et son impact sur la force de son signal et sur le débit offert à l'utilisateur. La cellule femto doit donc analyser périodiquement les rapports de mesure qu'elle reçoit et ajuster ses paramètres selon ces rapports.

Le processus de balayage du réseau et d'auto-optimisation est indispensable pour assurer le bon fonctionnement de la cellule femto, et par conséquent améliorer la performance du réseau entier de l'opérateur.

2.2 Simulation du réseau HetNet LTE

Avant d'introduire la couche de cellules femtos dans leurs réseaux, les opérateurs de réseaux de communication sans fil ont besoin d'étudier l'impact du déploiement de cette nouvelle couche de cellules sur le réseau existant de cellules macros en termes de couverture, capacité, interférence, etc. Le coût élevé d'offrir le matériel nécessaire pour cette évaluation directement dans le réseau a obligé ces opérateurs à développer de nouveaux algorithmes et simulateurs pour évaluer l'impact des cellules femtos sur le réseau avec le moindre coût et un temps de simulation inférieur au temps réel.

La simulation des cellules femtos se compose de deux niveaux [76] :

- Simulation au niveau lien (LLS) : elle s'intéresse au comportement du lien radio entre un seul transmetteur et un seul récepteur. Le comportement de ce lien est étudié bit par bit.
- Simulation au niveau système (SLS) : ce niveau de simulation étudie le comportement du réseau en tant qu'un ensemble de stations de base (BS), d'équipements d'utilisateur (UE) et d'autres entités assurant le bon fonctionnement du réseau. A ce niveau, on s'intéresse aux problèmes liés à la couche liaison de donnée (MAC) tels que les problèmes de mobilité, ordonnancement, gestion des ressources radio, etc. . . La simulation SLS permet d'étudier la performance moyenne du système dans un large endroit pour une longue période de temps. Elle permet d'évaluer la performance du réseau en utilisant différents indicateurs tels que l'indicateur clé de performance (KPI), le débit de transmission par utilisateur ou par cellule, le nombre d'appels bloqués, etc.

On s'intéresse dans nos travaux de recherche à la simulation SLS afin d'étudier l'impact du déploiement d'une couche de cellules femtos dans un réseau HetNet LTE.

2.2.1 Simulation SLS du réseau HetNet LTE

Afin de simuler le comportement du réseau HetNet LTE en déployant une nouvelle couche de cellules femtos, on doit tout d'abord modéliser le système LTE en question. En effet, plusieurs paramètres du réseau doivent être déterminés avant d'entamer la simulation. De même, différents scénarios de simulation doivent être déterminés.

D'autre part, la simulation doit offrir un suivi clair de la performance du réseau. Par conséquent, certains indicateurs doivent être enregistrés au cours de la simulation. Ce sont ces paramètres qui feront le sujet de l'analyse des résultats de la simulation.

2.2.1.1 Caractérisation du réseau

Avant de commencer la simulation, il faut bien caractériser et choisir le réseau sur lequel on va travailler. Plusieurs paramètres et caractéristiques doivent être déterminés. On cite dans ce qui suit quelques-uns de ces paramètres [76].

- **Les stations de base** : deux différents types de stations de base sont déployés : les stations de base macros eNBs, qui servent à assurer la couverture à l'extérieur (outdoor), et les points d'accès femtos HeNBs qui assurent la couverture à l'intérieur (indoor).
- **Les utilisateurs** : se sont les clients possédant des UEs et exigeant différents types de services et de mobilité. En effet, ils génèrent des requêtes pour différents types de trafic. On distingue les utilisateurs abonnés, qui sont autorisés à se connecter à travers une cellule femto spécifique, et les utilisateurs non-abonnés non autorisés à exploiter les services offerts par la cellule femto.
- **La carte de trafic** : elle offre des informations sur le nombre d'utilisateurs et les différents types de services disponibles dans une zone spécifique du réseau.
- **Les ressources** : elles représentent les ressources disponibles pour être allouées aux utilisateurs.
- **Le lien radio** : il caractérise la propagation des signaux entre le transmetteur et le récepteur. Il doit tenir compte de l'atténuation de perte de chemin, le shadow fading et l'atténuation multi-trajets.
- **Les antennes** : les stations de base et les UEs sont équipés par une ou plusieurs antennes, caractérisées par différents paramètres, tels que le gain, la polarisation, etc...
- **Les classes de service** : les différents types de service offerts par le réseau ainsi que la priorité de chaque classe doivent être définis.
- **Radio Access Bearer (RAB)** : l'ensemble des différents RABs détermine les combinaisons de la modulation et le schéma de codage qui peuvent être utilisés par le système.

2.2.1.2 Méthodologie de simulation SLS

La simulation est effectuée sur un système comportant N cellules, M utilisateurs, se connectant au réseau à travers un nombre précis de ressources radio. Un nombre R défini de RABs et S types de services sont disponibles.

La simulation se déroule en plusieurs étapes [76] :

- La configuration du réseau : mise en place des différents composants de la simulation (cellules, carte de trafic, utilisateurs, services, RABs).
- Le calcul de l'atténuation « pathloss » entre les UEs et les cellules voisines, tout en tenant compte des caractéristiques du modèle de propagation.
- Ensuite, l'UE sélectionne la meilleure cellule servante, ayant la meilleure qualité de signal. Toutefois, il faut vérifier l'autorisation de connecter l'UE à cette station de base.
- Sur la couche MAC, l'ordonnanceur classe les UEs selon leurs classes de trafic et leurs priorités, et alloue les ressources nécessaires. L'adaptation du lien est supportée pour les deux liens, ascendant (UL) et descendant (DL). Un contrôle de puissance est considéré en cas de besoin.
- Sur la couche physique, la transmission entre émetteur et récepteur est simulée. A ce stade, l'interférence entre les slots des trames de différentes cellules doit être calculée et la qualité de signal de chaque lien doit être estimée.
- Enfin les différents indicateurs formant le résultat de la simulation sont extraits.

Durant toute la simulation, différents aspects doivent être pris en considération. Parmi ces différents aspects on cite l'algorithme de génération d'utilisateurs et leurs états, la gestion de ressources radio, le calcul de débit de transmission, l'ordonnancement, etc.

2.2.2 Le simulateur HetNet LTE « System Level »

Bien que le simulateur « Link Level (LL) » s'intéresse à l'étude du comportement du lien radio entre un seul transmetteur et un seul récepteur pour investiguer une technique ou un algorithme, le simulateur « System Level (SL) » se concentre sur l'impact qu'auront les gains prédits lors des simulations LL sur les performances du réseau. De plus, le simulateur SL s'intéresse aux problèmes liés plus au réseau, tels que l'ordonnancement, la gestion de mobilité et la gestion d'interférence.

Dans nos travaux de recherche, nous avons exploité un simulateur LTE SL simulant le lien descendant d'un réseau LTE homogène composée uniquement de cellules macros. Ensuite, nous avons procédé à une adaptation de ce simulateur LTE SL afin de supporter le contexte de réseau HetNet LTE en insérant une nouvelle couche de cellules femtos déployées d'une façon aléatoire et uniforme dans chaque cellule macro. Par la suite, nous avons validé la nouvelle structure développée en vérifiant le bon fonctionnement des nouvelles cellules, la connectivité des usagers intérieurs à leurs cellules locales et la réussite du processus de basculement d'un usager de sa cellule macro servante à la cellule femto offrant une meilleure couverture, et inversement.

De ce fait, on va présenter dans cette section le simulateur HetNet LTE SL qu'on a adopté dans nos travaux de recherche. Ce simulateur SL est développé afin d'étudier les performances du système HetNet LTE, spécifié précédemment.

2.2.2.1 Description du simulateur

Le simulateur HetNet LTE SL est capable d'évaluer la performance du canal descendant partagé dans des réseaux HetNet LTE SISO et MIMO en utilisant les techniques de multiplexage spatial en boucle ouverte (OLSM) ainsi que les modes de transmission en diversité. La mise en œuvre du simulateur LTE SL offre un degré élevé de flexibilité. Son implémentation profite extensivement de la capacité de Matlab d'offrir la programmation orientée objet (OOP), introduite avec la version 2008a.

2.2.2.2 Structure du simulateur

La simulation de la totalité des liens radios entre l'équipement de l'utilisateur (UE) et une cellule macro (eNB) ou une cellule femto (HeNB) est une procédure complexe dans une simulation SL en raison de l'énorme quantité de puissance de calcul qui serait nécessaire [73]. Ainsi, dans les simulations SL, la couche physique est modélisée d'une façon abstraite par des modèles simplifiés qui capturent ses caractéristiques essentielles avec une grande précision et en même temps une faible complexité.

De même que pour d'autres simulateurs SL, la structure de notre simulateur HetNet LTE SL contient une partie centrale composée de deux modèles : un modèle de mesure du lien [72] et un modèle de performance du lien [28]. La figure suivante illustre le schéma fonctionnel du simulateur HetNet LTE SL.

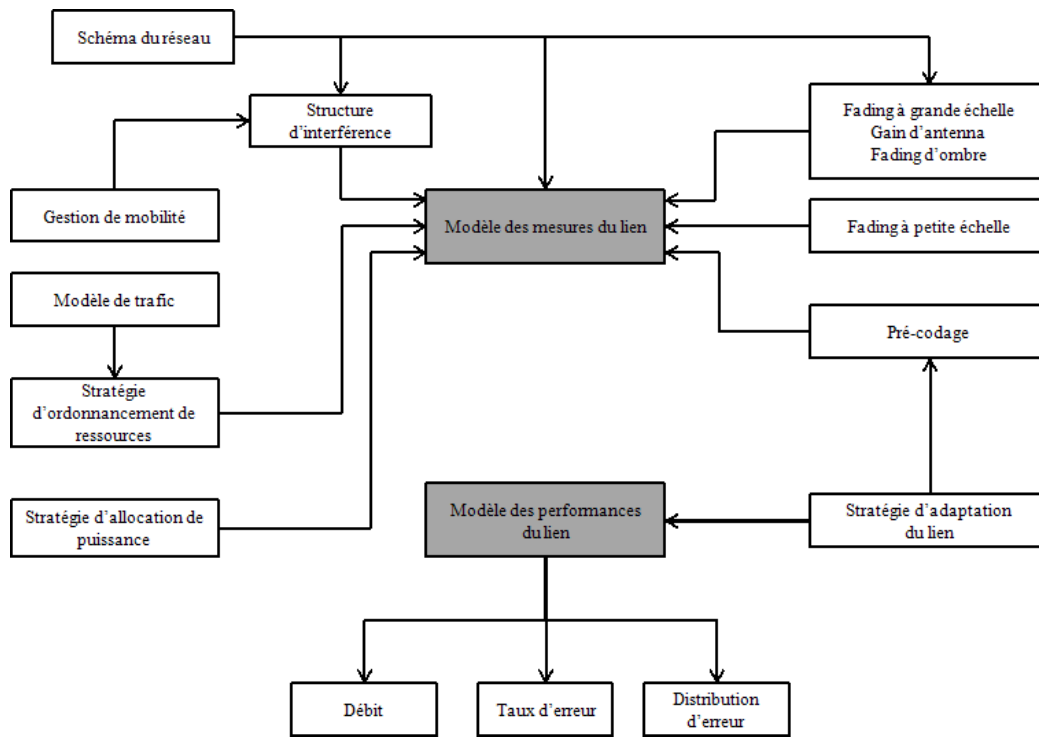


FIGURE 2.4: Schéma fonctionnel du simulateur HetNet LTE SL.

Le modèle de mesure du lien fait abstraction de la qualité du lien mesurée utilisée pour l'adaptation du lien et l'allocation des ressources. D'autre part, le modèle de performance du lien détermine le taux d'erreur par bloc (BLER) du lien à une complexité réduite.

La simulation est effectuée en définissant une région d'intérêt (ROI) dans laquelle les eNBs, les HeNBs et les UEs sont positionnés. Les eNBs sont situés aux centres de cellules macros outdoors hexagonales formant une grille couvrant le ROI. Ces cellules se composent de trois secteurs chacune. D'autre part, les HeNBs sont des cellules circulaires indoors, positionnées aléatoirement par

cellule eNB. Durant le temps de la simulation exprimé en TTIs, les nœuds eNBs et HeNBs restent fixes et ne changent pas de positions.

En outre, les UEs sont uniformément distribués par cellule eNB au TTI initial. Selon le scénario de simulation, certains usagers seront attachés à des cellules HeNBs. C'est seulement dans la région ROI où le mouvement des UEs et la transmission du canal descendant partagé (DLSCH) sont simulés. Le fonctionnement du simulateur suit le pseudo-code ci-dessous.

Algorithme 2.1 Pseudo-code du simulateur HetNet LTE.

```

Pour chaque TTI faire
  Déplacer UEs
  Si UEs hors ROI alors
    Réaffecter UEs au hasard dans ROI
  Pour chaque eNB/HeNB faire
    Recevoir le feed-back des UEs
    Ordonnancer les UEs
  Pour chaque UE faire
    1 - état du canal – modèle de qualité du lien– SINR
    2 - SINR, MCS– modèle de performance du lien – BLER
    3 - envoyer le feed-back au eNB/HeNB

```

2.2.2.3 Modèle des mesures du lien

Comme indiqué dans le pseudo-code mentionné dans la section précédente, le rapport signal sur interférence et bruit (SINR) a été adopté comme métrique afin de faire abstraction aux mesures de la qualité du lien. Le modèle des mesures du lien extrait les mesures qui serviront à l'adaptation du lien et l'allocation des ressources. Ce modèle vise à réduire le temps de l'exécution et la complexité des calculs en pré-générant le plus de paramètres nécessaires. Dans ce modèle de mesure, une attention spéciale est prise en compte dans la modélisation des corrélations spatiale et temporelle du canal présentes dans le système cellulaire. De ce fait, le module « modèle des mesures du lien » est divisé en trois parties : le pathloss macroscopique, l'évanouissement d'ombre (shadow fading) et le modèle du canal.

– Le pathloss macroscopique

Le pathloss macroscopique entre un secteur d'un nœud eNB/HeNB et un UE est utilisé pour modéliser conjointement à la fois le pathloss de propagation dû à la distance et le gain d'antenne. Le simulateur HetNet LTE SL implémente une grille du pathloss macroscopique entre toutes les positions du ROI et tous les nœuds du réseau.

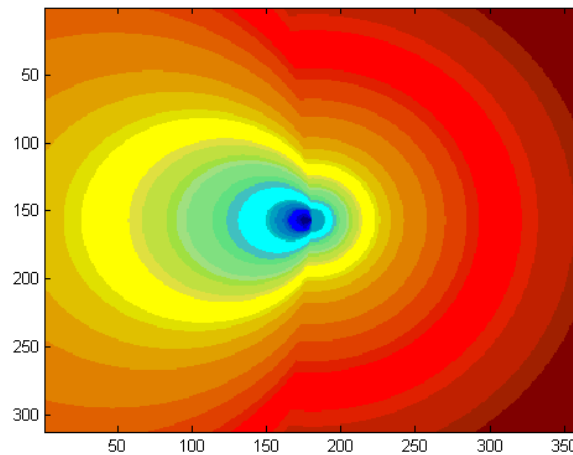


FIGURE 2.5: Le pathloss macroscopique d'une section d'une cellule macro.

Le simulateur supporte plusieurs modèles de pathloss macroscopique. Nous avons utilisé dans nos scénarios de simulation les deux modèles suivants : le modèle macro urbain basé sur le modèle de propagation modifié COST231 Hata adopté par 3GPP dans le développement du réseau LTE version 8 [4]. Le deuxième modèle de pathloss macroscopique est basé sur le modèle de canal ITU-Advanced défini par l'Union International des Télécommunication (UIT) [53]. Il permet de modéliser le pathloss de l'environnement indoor pour les utilisateurs femtos.

– L'évanouissement d'ombre

L'évanouissement d'ombre, en anglais « shadow fading », est causée par les obstacles qui se positionnent dans le trajet de propagation entre un nœud (eNB ou HeNB) et un UE. Il peut être interprété comme étant les irrégularités des caractéristiques géographiques du terrain introduites en respectant le pathloss macroscopique moyen obtenu à partir du modèle de pathloss macroscopique. Il est typiquement approximé par une distribution log-normale de moyenne 0 dB et une déviation standard de 10 dB [14, 49].

Le simulateur HetNet LTE SL utilise une méthode à faible complexité afin d'introduire une corrélation spatiale à travers un processus aléatoire gaussien bidimensionnel [39], tout en conservant les propriétés statistiques ainsi que la corrélation inter-sites [30].

– Le modèle du canal

Comme il est déjà mentionné, le pathloss macroscopique et la décoloration d'ombre sont des modèles qui dépendent de la position de l'UE et varient dans le temps. Cependant, l'évanouissement à petite échelle est modélisée comme étant un processus dépendant du temps.

Pour chaque mode de transmission MIMO, Transmission Diversity (TxD) et Open Loop Spatial Multiplexing (OLSM), un modèle basé sur un récepteur Zero Forcing (ZF) a été développé.

Dans cette version de simulateur, les systèmes à deux antennes de transmission ont été conçus. En se basant sur ses modèles, les traces des paramètres décrivant la variation temporelle et fréquentielle du canal peuvent être générées.

Le modèle du canal du simulateur vise à calculer un SINR par couche de flux. En effet, dans le système LTE, le terme "couches spatiales" désigne les différents flux générés à travers le multiplexage spatial. Par conséquent, une couche de flux peut être définie comme étant le mappage des symboles avec les ports de l'antenne de transmission. Par la suite, chaque couche de flux est identifiée par un vecteur de pré-codage de taille égale au nombre des ports de l'antenne de transmission [63].

2.2.2.4 Modèle des performances du lien

Le modèle des performances du lien permet de déterminer le taux d'erreur par bloc (BLER) au niveau du récepteur en se basant sur les informations fournies sur l'allocation des ressources et les schémas de codage et de modulation (MCS).

Pour le système LTE, 15 différents MCS sont définis, traduits par 15 valeurs différentes de l'indicateur de la qualité du canal (CQI). Ces CQIs utilisent un codage avec un taux compris entre 1/13 et 1, combiné avec les modulations 4-QAM, 16-QAM et 64-QAM [8].

Afin d'évaluer le BLER des blocs de transport reçus (TB), le simulateur exploite les courbes de performance d'un bruit gaussien blanc additif (AWGN) au niveau LL. Ensuite, il effectue un mappage SINR-BLER en utilisant une valeur effective du SINR, notée γ_{eff} . Cette valeur est obtenue à travers le mappage de l'ensemble des SINRs des sous-porteuses allouées aux TB de l'UE et l'ensemble des SINRs équivalents pour un AWGN. La figure suivante représente les courbes de BLER pour le AWGN en mode de transmission SISO.

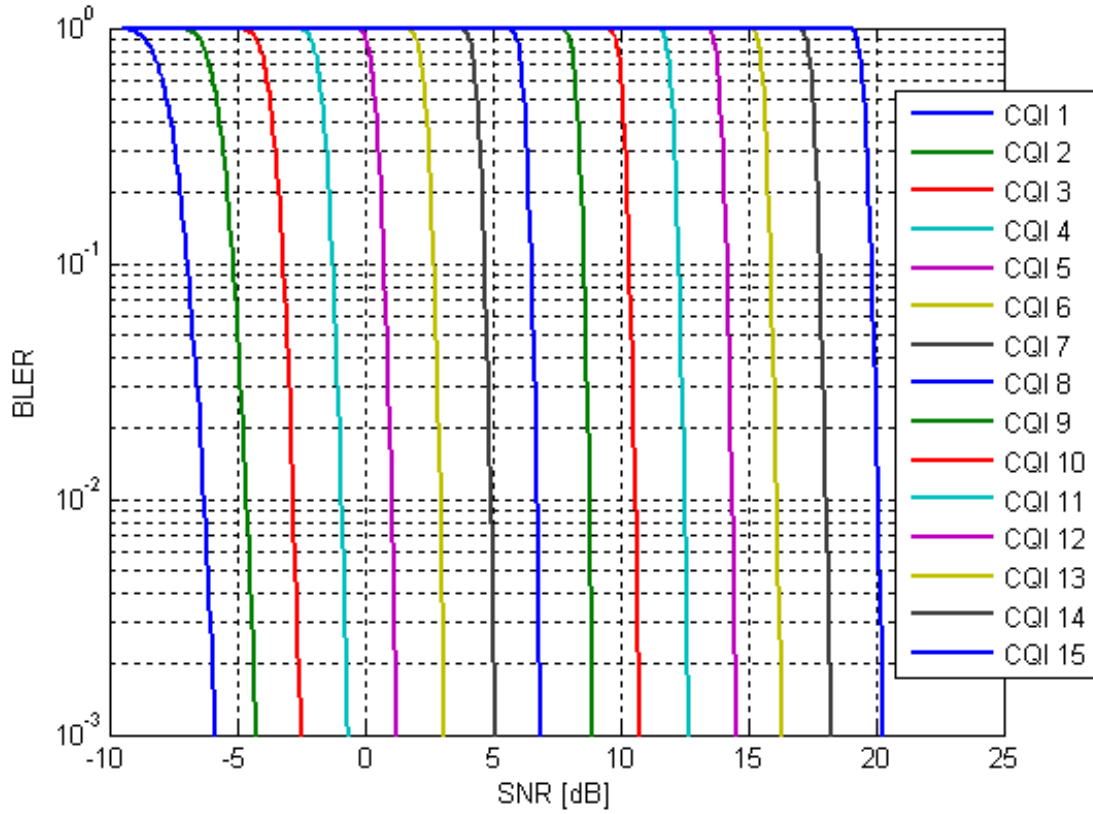


FIGURE 2.6: Courbes de BLER pour le AWGN.

Le mappage exponentiel et effectif du ratio signal sur interférence et bruit (EESM) [41, 59, 68] est la méthode utilisée par le simulateur pour obtenir le SINR effectif pour un TB donné. Cette γ_{eff} peut être utilisée pour assurer le mappage avec le BLER obtenu à partir des simulations LL du AWGN.

La valeur de γ_{eff} est obtenue en effectuant la moyenne non linéaire suivante pour les SINRs des différents blocs de ressources (RB) :

$$\gamma_{eff} = EESM(\gamma_i, \beta) = -\beta \cdot \ln\left(\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N e^{-\frac{SINR_i}{\beta}}\right)$$

où N est le nombre total des RBs à moyenner et le paramètre β est calibré à travers les simulations LL afin d'adapter la fonction de compression aux BLERs résultant du AWGN [70]. Il est possible de ne pas considérer dans le calcul tous les TBs des sous-porteuses, et plutôt en considérer seulement un sous-ensemble aussi longtemps que l'espacement fréquentiel entre deux valeurs SINRs n'excède pas la moitié de la cohérence de la bande passante [70]. Par conséquent, le simulateur HetNet LTE SL réduit la quantité de mémoire requise pour la sauvegarde des traces du canal durant la simulation en n'utilisant que deux SINRs par TB dans le calcul de γ_{eff} .

En utilisant les courbes de BLER du AWGN, la valeur de γ_{eff} est mappée au BLER. Ensuite, il est décidé par l'intermédiaire d'un tirage au sort si le TB reçu a été correctement reçu et un rapport d'acquittement sera alors généré.

Relativement au modèle des mesures de performance, le rapport de feedback CQI envoyé par l'UE permet au eNB/HeNB d'avoir une figure de mérite de l'état du canal de l'UE correspondant. La stratégie de feedback CQI effectue le mappage SINR-CQI gardant les points correspondant au 10% des courbes BLER. La figure suivante illustre la fonction de mappage SINR-CQI.

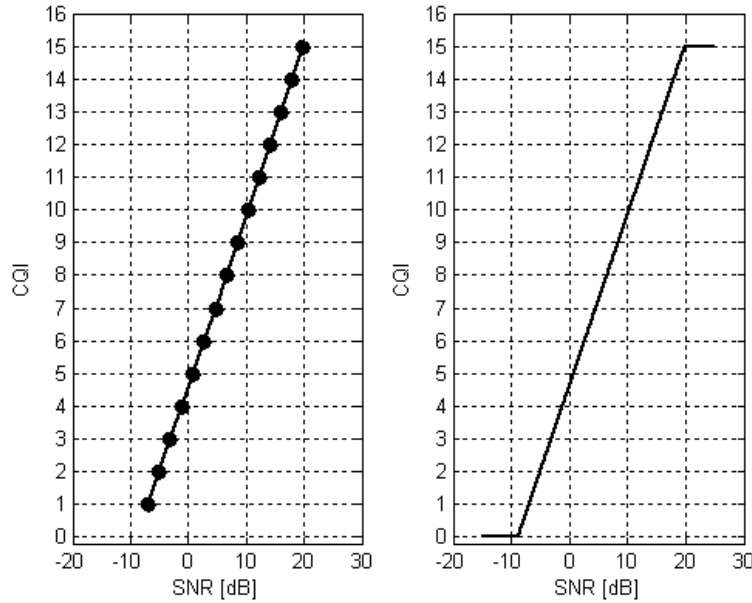


FIGURE 2.7: Mappage SINR-CQI.

Les parties entières des CQIs obtenues correspondent alors aux valeurs des CQIs qui seront rapportés au eNB/HeNB.

2.2.3 Scénarios et paramètres de simulation

Le réseau HetNet LTE à simuler est composé de 7 cellules macros formant la région d'intérêt ROI. Chaque cellule macro est caractérisée par une couverture hexagonale. La distance séparant deux cellules macros est égale à 500 m. Elle est composée de trois secteurs à l'aide d'antennes sectorielles spécifiées par les exigences 3GPP TS 36.942 [14]. La puissance de transmission maximale de chaque antenne est fixée à 43 dBm.

Ces cellules desservent un nombre total d'utilisateurs égale à 175 utilisateurs, soit 25 utilisateurs par cellule macro. Ces utilisateurs se déplacent dans la ROI avec une vitesse constante de 30 Km/h. Les utilisateurs changent donc de position à chaque TTI.

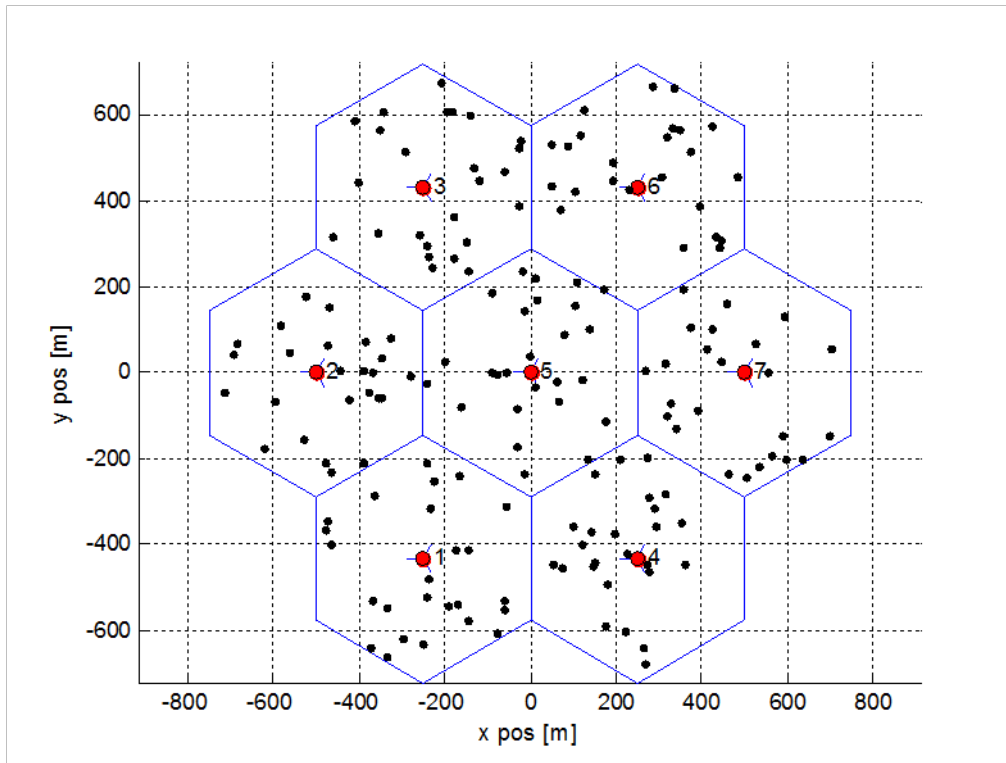


FIGURE 2.8: Schéma du réseau initial (scénario référence).

Le scénario référence est un réseau LTE homogène composé seulement des cellules macros. On simule aussi 5 autres scénarios déployant différents nombres de cellules femtos.

En effet, on assimile une cellule femto à une couverture circulaire de rayon égal à 20 m, assurée à travers une antenne omnidirectionnelle de puissance de transmission maximale égale à 20 dBm.

On incrémente progressivement, dans chaque scénario, le nombre de cellules femtos introduites dans le réseau. Initialement, on attache forcément un usager à chaque cellule femto introduite. La vitesse de déplacement de l'utilisateur femto est fixée à 3 Km/h. Durant la simulation, chaque usager bascule à la cellule lui garantissant un meilleur signal.

On mesure pour chaque scénario le débit total du réseau. Par conséquent, on compare le gain de débit obtenu en intégrant la couche de cellule femto par rapport au scénario référence sans cellules femtos.

Le tableau suivant résume les paramètres de simulation.

Paramètres	Cellule macro	Cellule femto
Fréquence du système	2 GHz	
Bande de fréquence	5 MHz (partagée)	
Schéma de cellule	Grille hexagonale de 7 cellules, 3 secteurs par cellule	Cellule circulaire, 1 secteur par cellule
Taille de cellule	250 m	20 m
Modèle de gain d'antenne	TS 36.942	Omnidirectionnelle
Gain d'antenne Max	15 dBi	0 dBi
Puissance de transmission Max	43 dBm	20 dBm
Facteur de bruit du récepteur	9 dB	9dB
Niveau du bruit thermique	-174 dBm/Hz	-174 dBm/Hz
Modèle de pathloss	Cost 231 urban macro	Indoor Hotspot
Nombre initial des UEs	25 UEs	1 usager forcé
Vitesse d'UE	30 Km/h	3 Km/h
Ordonnanceur	Proportional Fair	
Temps de simulation en TTIs	1000	

TABLE 2.1: Paramètres de simulation.

2.2.4 Résultats de simulation

Lors de la simulation, on a enregistré le débit total de la couche de cellules macros, ainsi que la couche de cellules femtos. On a calculé par la suite le débit total de tout le réseau HetNet pour différents scénarios de déploiement de cellules femtos. Les résultats sont présentés dans la figure suivante.

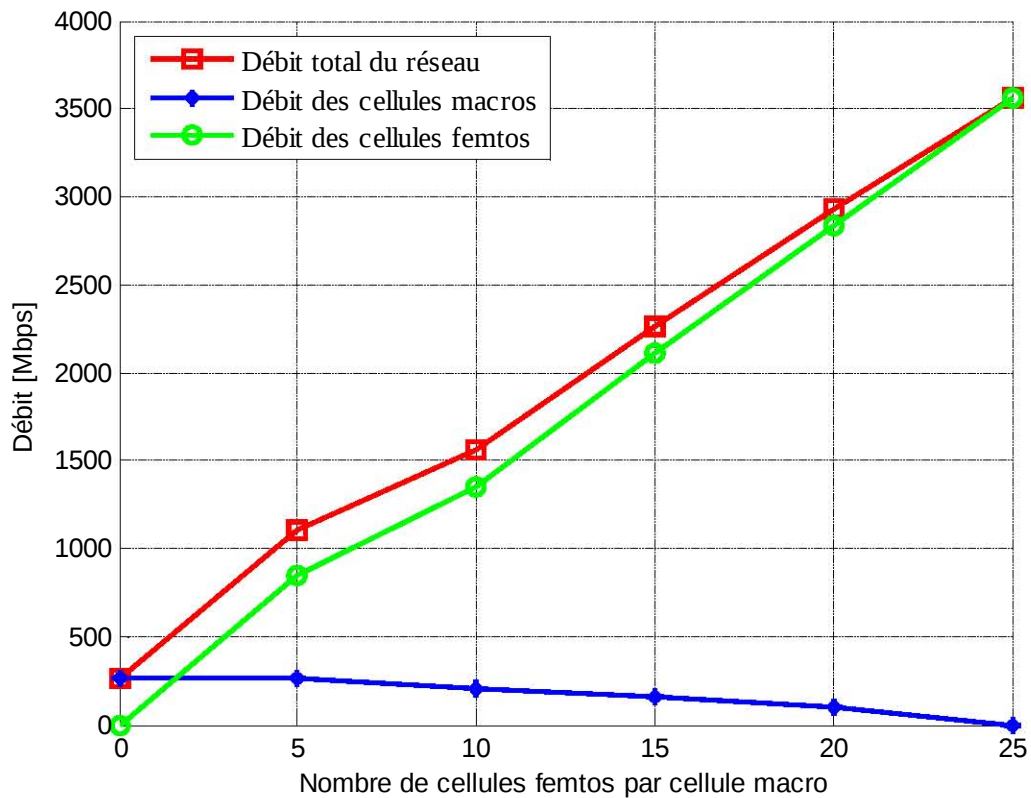


FIGURE 2.9: Débits des couches de cellules du réseau HetNet LTE.

Les résultats obtenus confirment la performance du réseau HetNet LTE discutée auparavant. En effet, le débit total du réseau augmente en incrémentant le nombre de cellules femtos dans le réseau. En outre, le débit total des cellules macros diminue puisque de plus en plus d'utilisateurs migrent vers des cellules femtos voisines qui leur offrent une meilleure couverture et qualité de signal. Par la suite, le débit total des cellules femtos augmente, ce qui améliore la performance du réseau.

Dans la figure suivante, on a tracé le gain en débit par rapport au scénario référence qui déploie seulement une couche de cellules macros.

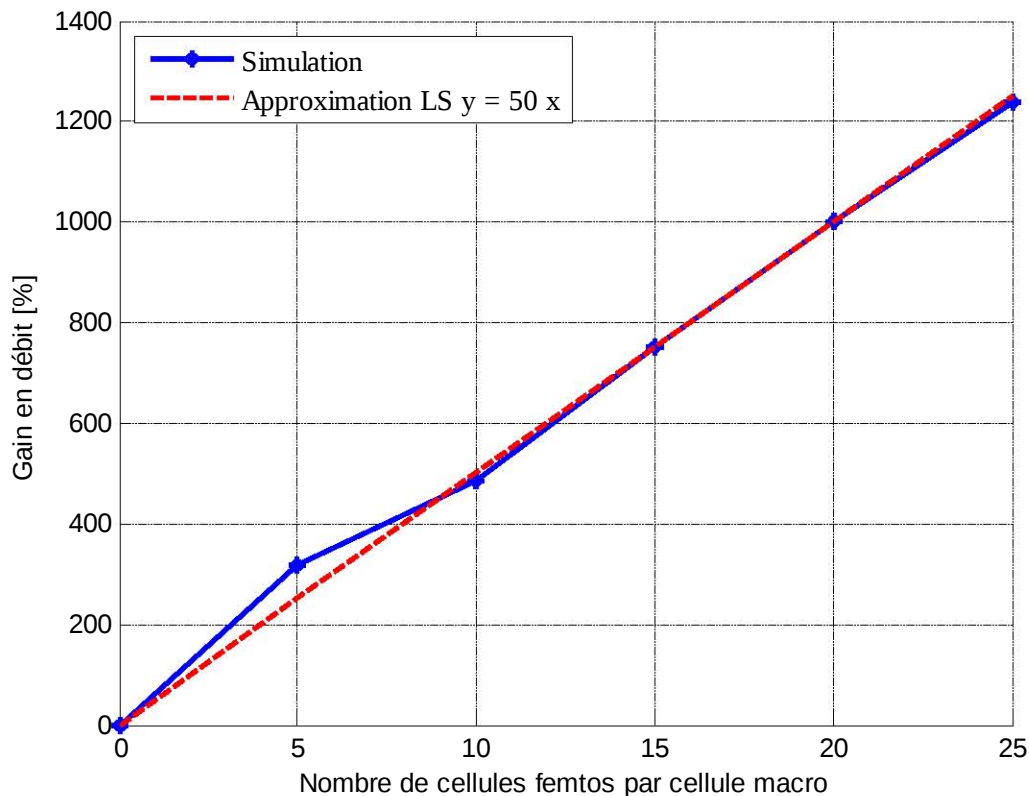


FIGURE 2.10: Gain en débit du réseau HetNet LTE comparé au réseau LTE homogène.

On a tracé de même la courbe d'approximation linéaire de la courbe des résultats de simulation. Cette courbe approximative est alors assimilée à une droite de pente égale à 50. On remarque que le gain en débit du réseau est proportionnel au déploiement des cellules femtos dans le réseau.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié en premier lieu la procédure d'insertion d'une cellule femto dans un réseau LTE existant et les différentes étapes à suivre afin de réussir cette insertion. Ensuite, nous avons présenté la structure générale du simulateur HetNet LTE SL que nous avons développé dans le but de vérifier le gain en débit et l'augmentation de la capacité du réseau HetNet LTE comparé au réseau LTE homogène. En effet, on a prouvé à travers les simulations SL que le réseau HetNet LTE est capable de fournir de meilleurs services aux usagers du réseau. En outre, les cellules femtos introduites offrent aux usagers une meilleure couverture et des débits dépassant ceux offerts par les cellules macros du réseau LTE homogène. De ce fait, le concept de cellule femto promet de satisfaire les exigences des systèmes IMT-Advanced.

Cependant, dans les environnements denses déployant un grand nombre de cellules femtos, le problème d'interférence apparaît et cause une dégradation des performances du réseau. Par conséquent, on propose dans le chapitre suivant une stratégie d'annulation d'interférence qui permet de remédier à ce problème.

Chapitre 3

L'annulation de l'interférence DL dans un réseau HetNet LTE

Introduction

Dans le réseau HetNet LTE, les cellules femtos sont déployées conjointement avec les cellules macros. Cette nouvelle couche de cellules peut générer une interférence DL qui peut affecter les usagers voisins attachés aux cellules macros (MUE), ainsi que les usagers voisins attachés à d'autres cellules femtos (FUE). Ces scénarios d'interférence causent une dégradation de la performance du système.

Cependant, dans nos travaux de recherche, on propose une stratégie d'annulation de l'interférence DL. En effet, cette stratégie vise à optimalement sélectionner les signaux interférents à annuler afin de minimiser l'impact de l'interférence sur la qualité de signal offerte à l'utilisateur et ainsi améliorer la performance du système.

Dans ce chapitre, on présente une étude détaillée de trois stratégies d'annulation de l'interférence DL élaborées ainsi qu'une analyse comparative entre elles en termes d'impact sur la performance du réseau HetNet LTE à travers des simulations SL.

3.1 Le modèle du système

Afin de remédier au problème d'interférence du lien DL, la stratégie proposée dans nos travaux consiste à diminuer l'impact des signaux interférents sur le SINR reçu par l'utilisateur.

On suppose que notre système HetNet LTE est composé d'une couche de cellules macros et une couche de cellules femtos. Ces nœuds desservent un ensemble d'utilisateurs qu'on note $\mathcal{L}$. Considérant un utilisateur quelconque $u \in \mathcal{L}$, il est évident que l'ensemble des cellules voisines interférentes, noté J_u , dégradent sévèrement le SINR de cet utilisateur.

En effet, chaque utilisateur u calcule son SINR reçu à chaque bloc de ressources radio (RB), à chaque instant de transmission TTI, en utilisant l'expression suivante :

$$\gamma_{u,r} = \frac{P_{u,i(u),r}}{\sum_{j \in J_u} P_{u,j,r} + \sigma_{u,r}} \quad (3.1)$$

où $\gamma_{u,r}$ désigne le SINR reçu, $P_{u,i(u),r}$ est la puissance reçue dans le RB r de la part de la cellule $i(u)$ à qui il est attaché, $P_{u,j,r}$ désigne la puissance reçue de la part de la cellule voisine interférente $j \in J_u$ transmettant dans le même RB r au même TTI, et $\sigma_{u,r}$ est la puissance du bruit Gaussien reçu par l'utilisateur u .

Afin de définir rigoureusement l'expression du SINR reçu de l'utilisateur u , on définit les paramètres suivants :

- $L_{M,u,i(u),r}$ modélise le gain d'antenne ainsi que la propagation du pathloss due à la distance séparant l'utilisateur u et sa station de base $i(u)$.
- $L_{S,u,i(u),r}$ désigne l'évanouissement causé par les obstacles du trajet entre l'utilisateur u et sa station de base $i(u)$.

En se basant sur ces paramètres, la puissance $P_{u,i(u),r}$ reçue à partir de la cellule $i(u)$ dans le RB r est exprimée comme suit :

$$P_{u,i(u),r} = L_{M,u,i(u),r} \times L_{S,u,i(u),r} \times P_{i(u),r,tx} \quad (3.2)$$

où $P_{i(u),r,tx}$ désigne la puissance de transmission de la cellule $i(u)$ dans le RB r .

Similairement, on exprime la puissance interférente $P_{u,j,r}$ reçue à partir de la cellule voisine $j \in J_u$ dans le RB r comme suit :

$$P_{u,j,r} = L_{M,u,j,r} \times L_{S,u,j,r} \times P_{j,r,tx} \quad (3.3)$$

où $P_{j,r,tx}$ désigne la puissance de transmission de la cellule voisine $j \in J_u$ dans le RB r , $L_{M,u,j,r}$ modélise le gain d'antenne ainsi que la propagation du pathloss due à la distance séparant l'utilisateur u et la station de base voisine $j \in J_u$ et $L_{S,u,j,r}$ désigne l'évanouissement causé par les obstacles du trajet entre l'utilisateur u et la station de base voisine $j \in J_u$.

Par conséquent, le SINR reçu de l'utilisateur u est calculé en utilisant l'expression suivante [42, 64] :

$$\gamma_{u,r} = \frac{L_{M,u,i(u),r} \times L_{S,u,i(u),r} \times P_{i(u),r,tx}}{\sum_{j \in J_u} L_{M,u,j,r} \times L_{S,u,j,r} \times P_{j,r,tx} + \sigma_{u,r}}. \quad (3.4)$$

Pour simplifier la présentation, on utilisera dans le reste de ce rapport l'expression du SINR reçu citée dans l'équation (3.1).

3.2 Principe de la stratégie d'annulation de l'interférence DL

Plusieurs travaux de recherche ont été développés afin de remédier au problème de l'interférence DL dans le réseau HetNet LTE et différentes approches ont été proposées comme solutions à ce problème.

En effet, les techniques de coordination d'interférence ont été couramment présentées comme une solution efficace pour éliminer l'interférence DL. Le concept de base de la coordination d'interférence consiste à appliquer des restrictions lors de la gestion des ressources temporelles et fréquentielles de manière coordonnée entre les stations de base. [60] et [33] discutent différentes solutions d'allocation de ressources pour le réseau HetNet. Egalement, plusieurs algorithmes de contrôle de puissance ont été largement développés afin d'optimiser la puissance de transmission des stations de base dans un réseau HetNet, comme il est discuté dans [29] et [56]. De plus, une

nouvelle stratégie de transmission sans fil, appelée alignement d'interférence, a été proposée afin de réduire l'impact de l'interférence DL. Elle est basée sur la coordination entre plusieurs émetteurs afin de mutuellement aligner l'interférence au niveau du récepteur UE, ce qui simplifie sa suppression. [66] propose un nouvel algorithme d'alignement hiérarchique de l'interférence qui vise à atténuer cette interférence dans un réseau HetNet. Par ailleurs, un récepteur combinant le rejet de l'interférence (IRC) a été proposé comme étant un récepteur capable d'effectuer une suppression spatiale des signaux interférents reçus. En effet, [34] a investigué l'impact des gains obtenus à partir du récepteur IRC combiné avec la technique de sélection d'antennes en termes d'amélioration de la performance de suppression de l'interférence pour un scénario d'interférence co-canal des cellules femtos. D'autre part, Nishimori et al. [55] ont proposé une technique d'annulation d'interférence basée sur une station de relay (RS) pour le réseau HetNet LTE-Advanced. Contrairement aux schémas de transmission coopérative conventionnelle, la RS décode l'interférence dans une première période de transmission, et puis la transfère à l'équipement de l'utilisateur (UE) dans une deuxième période. Par conséquent, le UE exploite l'interférence décodée et envoyée par la RS pour estimer le signal désiré. Cependant, cette technique exige le déploiement de nœuds supplémentaires et augmente la charge du réseau.

A travers ce travail, on propose trois nouvelles stratégies d'annulation de l'interférence DL dans un réseau LTE HetNet. En effet, la technique d'annulation d'interférence présente l'avantage de la simplicité du concept en exigeant un minimum d'efforts de coordination et de surcharge du réseau. De plus, elle permet aux usagers de transmettre simultanément sans aucune restriction des ressources temporelles et/ou fréquentielles, ce qui résulte en une meilleure efficacité spectrale et une augmentation du débit. Cependant, la technique d'annulation possède le seul inconvénient de mettre une certaine charge de calcul du côté du récepteur. Par conséquent, le récepteur annulateur est capable d'assurer la fiabilité de la réception des données, même en présence des signaux interférents.

Par la suite, la stratégie de sélection des signaux interférents à annuler détermine la performance du récepteur annulateur. En conséquence, on propose dans nos travaux de recherche une stratégie de sélection optimale des signaux interférents à annuler, tout en la comparant avec deux autres stratégies plus simples. L'objectif de la stratégie proposée est de déterminer d'une façon optimale les signaux interférents à annuler dans l'objectif d'améliorer le SINR reçu par l'utilisateur. Cette nouvelle stratégie se distingue par le fait qu'elle se base sur de nouvelles fonctions d'utilité qui permettent de maximiser le SINR, le débit ainsi que la QoS tout en tenant compte des coûts de calcul qui résultent des efforts d'annulation. Du point de vue analytique, le terme $\sum_{j \in J_u} P_{u,j,r}$ de l'équation (3.1) doit être minimisé afin d'améliorer le SINR. En outre, ce terme représente la somme des puissances reçues des cellules voisines transmettant au même RB et au même instant que l'utilisateur reçoit le signal qui lui est destiné.

3.2.1 Principe de base

La stratégie d'annulation de l'interférence DL proposée consiste à sélectionner les signaux interférents à annuler, ainsi que de déterminer leurs taux d'annulation. Le principe de base analytique de cette stratégie vise donc à annuler les signaux interférents selon des taux compris entre 0 et 1, appelés aussi coefficients d'annulation. Ces coefficients, notés $a_{u,j,r}$ ($j \in J_u$), réduisent les valeurs de ces puissances interférentes reçues, et par la suite minimisent le terme $\sum_{j \in J_u} P_{u,j,r}$.

Par conséquent, le SINR reçu résultant après la procédure d'annulation, appelé SINR post-IC, est exprimée comme suit :

$$\gamma_{u,r} = \frac{P_{u,i(u),r}}{\sum_{j \in J_u} a_{u,j,r} \times P_{u,j,r} + \sigma_{u,r}}. \quad (3.5)$$

Afin de déterminer les valeurs des coefficients $a_{u,j,r} (j \in J_u)$, nous avons élaboré trois stratégies qui permettent d'exprimer adéquatement ces coefficients en fonction des autres paramètres. En effet, dans la première stratégie, les coefficients dépendent seulement des puissances interférentes reçues $P_{u,j,r}$. Dans la deuxième, les valeurs des coefficients dépendent de la puissance reçue de la part de la cellule servante $P_{u,i(u),r} (j \in J_u)$ ainsi que des puissances interférentes reçues à partir des cellules voisines $P_{u,j,r} (j \in J_u)$. Dans la troisième stratégie, on essaye de calculer les coefficients d'une façon optimale permettant de maximiser le SINR reçu de l'utilisateur en se basant sur le concept de maximisation de fonctions d'utilité. On détaillera ces trois stratégies dans les sections suivantes.

3.2.2 La première stratégie

Le principe de base la première stratégie consiste simplement à calculer les coefficients d'annulation dépendamment de la contribution de chaque puissance dans l'interférence résultante reçue. En effet, le coefficient $P_{u,j,r} (j \in J_u)$ correspondant à la puissance interférente reçue $a_{u,j,r} (j \in J_u)$ est calculé en utilisant l'expression suivante :

$$a_{u,j,r} = 1 - \frac{P_{u,j,r}}{\sum_{k \in J_u} P_{u,k,r}}. \quad (3.6)$$

En utilisant cette expression, le coefficient $a_{u,j,r}$ est inversement proportionnel au ratio de la puissance interférente reçue $P_{u,j,r}$ sur la somme des puissances interférentes reçues $\sum_{k \in J_u} P_{u,k,r}$. Par conséquent, les puissances qui interfèrent le plus sur l'utilisateur u vont être réduites avec des coefficients de valeurs plus faibles.

En utilisant les expressions (3.5) et (3.6), on définit la première stratégie d'annulation de l'interférence DL comme suit :

Algorithme 3.1 Première stratégie d'annulation de l'interférence DL

Pour chaque TTI

Pour chaque RB r

- 1- chaque usager $u \in \mathcal{L}$ mesure $P_{u,i(u),r}$, $P_{u,j,r}$ pour $j \in J_u$ et $\sigma_{u,r}$.
- 2- l'utilisateur u calcule les coefficients $a_{u,j,r} (j \in J_u)$ en utilisant $a_{u,j,r} = 1 - \frac{P_{u,j,r}}{\sum_{k \in J_u} P_{u,k,r}}$.
- 3- l'utilisateur u calcule le SINR reçu post-IC en utilisant l'expression
$$\gamma_{u,r} = \frac{P_{u,i(u),r}}{\sum_{j \in J_u} a_{u,j,r} \times P_{u,j,r} + \sigma_{u,r}}.$$

fin

fin

Cette stratégie tient compte uniquement des puissances interférentes $P_{u,j,r}(j \in J_u)$. Cependant, elle ne prend pas en considération la puissance reçue de la cellule servante $P_{u,i(u),r}$. Par conséquent, l'interférence peut ne pas être réduite suffisamment pour améliorer la qualité de signal reçu.

3.2.3 La deuxième stratégie

Cette stratégie est définie afin de surpasser la limite de la première. En effet, la deuxième stratégie prend en considération les puissances $P_{u,i(u),r}$ et $P_{u,j,r}(j \in J_u)$ dans le calcul des coefficients.

L'idée de base de cette stratégie est de réduire suffisamment la puissance interférente reçue $P_{u,j,r}(j \in J_u)$ jusqu'à être inférieure à un seuil défini par $\frac{P_{u,i(u),r}}{\alpha}$, où α est un paramètre à fixer. Par conséquent, l'expression de chaque coefficient $a_{u,j,r}(j \in J_u)$ est définie comme suit :

$$a_{u,j,r} = \min\left(1, \frac{P_{u,i(u),r}}{\alpha P_{u,j,r}}\right). \quad (3.7)$$

En utilisant l'expression (3.5) et (3.7), on définit la deuxième stratégie d'annulation de l'interférence DL comme suit :

Algorithme 3.2 Deuxième stratégie d'annulation de l'interférence DL

Pour chaque TTI

Pour chaque RB r

- 1- chaque usager $u \in \mathcal{L}$ mesure $P_{u,i(u),r}$, $P_{u,j,r}$ pour $j \in J_u$ et $\sigma_{u,r}$.
- 2- l'usager u calcule les coefficients $a_{u,j,r}(j \in J_u)$ en utilisant $a_{u,j,r} = \min\left(1, \frac{P_{u,i(u),r}}{\alpha P_{u,j,r}}\right)$.
- 3- l'usager u calcule le SINR reçu post-IC en utilisant l'expression
$$\gamma_{u,r} = \frac{P_{u,i(u),r}}{\sum_{j \in J_u} a_{u,j,r} \times P_{u,j,r} + \sigma_{u,r}}.$$

fin

fin

Cependant, la performance de cette deuxième stratégie dépend étroitement du paramètre α . En effet, pour un α très faible, on risque de ne pas réduire assez suffisamment l'interférence qui gêne l'usager. Dans le cas contraire (α important), la réalisation pratique de l'annulation devient plus complexe pour des valeurs de coefficients très faibles.

Par conséquent, une troisième stratégie est proposée afin de calculer les coefficients $a_{u,j,r}(j \in J_u)$ d'une façon optimale.

3.2.4 La troisième stratégie

Dans cette troisième stratégie, on cherche à proposer une solution optimale qui permet de calculer les valeurs optimales des coefficients $a_{u,j,r}(j \in J_u)$ en utilisant le concept de fonctions d'utilité.

En effet, les fonctions d'utilité ont été largement adoptées par les algorithmes de contrôle de puissance ainsi que les approches d'allocation de ressources radios. De plus, quelques solutions d'alignement de l'interférence se basent dans leurs concepts sur ces fonctions. Cependant, au meilleur de notre connaissance, ce concept n'a pas été encore utilisé par les stratégies d'annulation de l'interférence DL dans un réseau HetNet. De plus, la maximisation de la fonction d'utilité permet à l'utilisateur de sélectionner proprement les signaux interférents reçus à annuler et détermine optimalement le taux d'annulation pour chaque signal interférent.

Par conséquent, on définit pour chaque usager $u \in \mathcal{L}$ une fonction d'utilité nette notée $U_{net,u}$ qu'il cherche à maximiser. L'expression standard de cette fonction pour une station de base dans un réseau cellulaire se compose d'une fonction d'utilité notée U_u qui représente le degré de satisfaction du client, et d'une fonction de coût C_u qui représente le coût encouru afin d'atteindre ce niveau de satisfaction. L'expression de la fonction d'utilité nette $U_{net,u}$ est présentée alors par l'expression suivante :

$$U_{net,u}(\gamma_u) = U_u(\gamma_u) - C_u(\gamma_u). \quad (3.8)$$

Il est à noter que la fonction de coût est introduite afin de représenter les coûts de calcul engendrés par un processus d'annulation précis caractérisé par des erreurs d'implémentation réduits. En effet, l'implémentation d'une annulation parfaite de l'interférence [i.e. $a_{u,j,r} = 0 (j \in J_u)$] est pratiquement non réalisable. De plus, l'annulation quasi-parfaite d'un signal interférent reçu ne peut être effectuée sans exiger une lourde charge de calcul. La fonction C_u permet donc de concevoir une stratégie d'annulation efficace et réalisable. Par conséquent, pour chaque usager, on utilise la même fonction de coût définie comme suit [27] :

$$C_u(\gamma_u) = \beta \gamma_u \quad (3.9)$$

où β est le paramètre de coût à déterminer.

Afin de calculer d'une façon optimale les valeurs des coefficients $a_{u,j,r} (j \in J_u)$, on cherche à calculer le SINR post-IC optimal noté $\hat{\gamma}_u$, qui permet de maximiser la fonction d'utilité nette $U_{net,u}$. Pour ce faire, on dérive l'équation (3.8) par rapport à la variable γ_u , en utilisant aussi l'expression (3.9). Le SINR post-IC optimal $\hat{\gamma}_u$ sera donc exprimé comme suit :

$$\frac{dU_{net,u}(\gamma_u)}{d\gamma_u} = U'_u(\hat{\gamma}_u) - \beta = 0 \quad \Longleftrightarrow \quad \hat{\gamma}_u = U_u'^{-1}(\beta). \quad (3.10)$$

En remplaçant l'équation (3.5) par l'expression du SINR optimal (3.10), on extrait la condition suivante :

$$\sum_{j \in J_u} a_{u,j,r} \times P_{u,j,r} = \frac{P_{u,i(u),r}}{U_u'^{-1}(\beta)} - \sigma_{u,r}. \quad (3.11)$$

Par conséquent, on peut exprimer le coefficient $a_{u,j,r} (j \in J_u)$ comme suit :

$$a_{u,j,r} = \frac{1}{j_u P_{u,j,r}} \left[\frac{P_{u,i(u),r}}{U_u'^{-1}(\beta)} - \sigma_{u,r} \right] \quad (3.12)$$

où j_u représente le nombre de cellules interférentes [$j_u = \text{card}(J_u)$].

En utilisant cette expression des coefficients $a_{u,j,r}(j \in J_u)$, on réussit à réduire l'interférence DL reçue par l'utilisateur $u \in \mathcal{L}$ jusqu'à un niveau garantissant un SINR optimal.

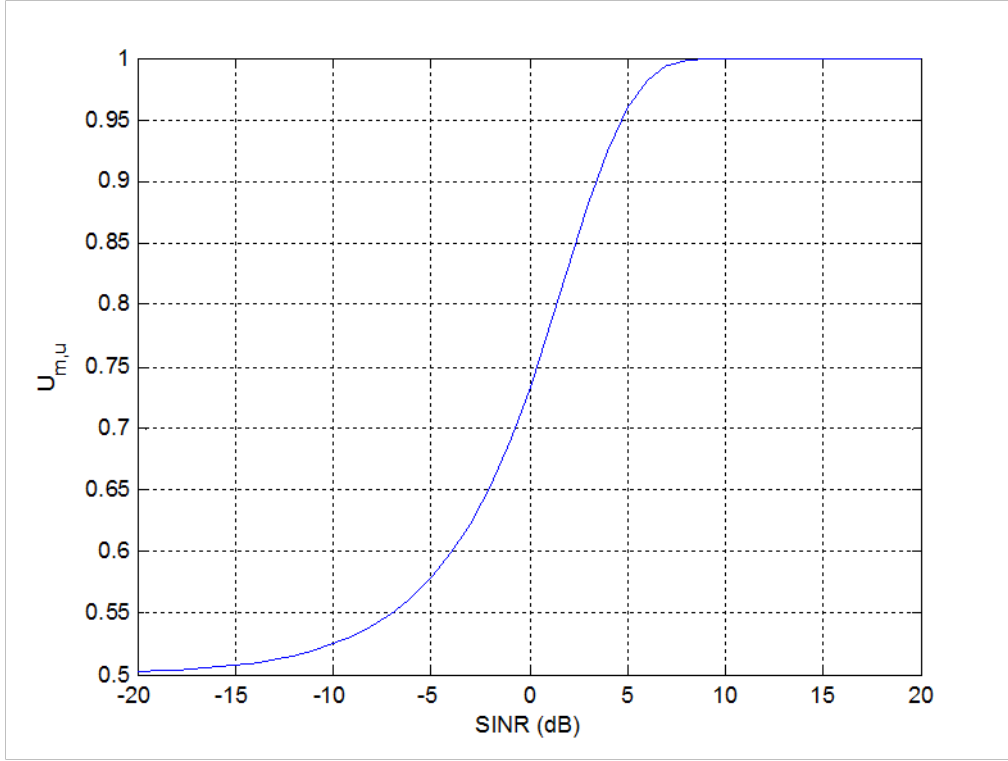
Cependant, dans ce processus de calcul de coefficients, on distingue entre deux types d'utilisateurs, MUE et FUE.

3.2.4.1 Fonction d'utilité et coefficients d'annulation du MUE

Pour chaque utilisateur MUE, on définit une fonction d'utilité qui représente le degré de satisfaction de l'utilisateur en termes de qualité de service. Analytiquement, on définit pour l'utilisateur MUE $u \in \mathcal{L}_m$ sa fonction d'utilité notée $U_{m,u}$ comme suit [40] :

$$U_{m,u}(\gamma_u) = \frac{1}{1 + \exp(-\alpha_m \gamma_u)} \quad (3.13)$$

où $\mathcal{L}_m$ représente l'ensemble des utilisateurs macros et α_m un paramètre qui contrôle la pente de la fonction d'utilité. Il est à constater qu'un haut SINR $\hat{\gamma}_u$ peut être atteint si la dérivée de la fonction d'utilité $U'_{u,m}$ devient plus plate. Ceci revient à prendre des valeurs plus petites du paramètre α_m . Il est à noter qu'une forme similaire de fonction d'utilité a été proposée dans [40] pour le contrôle de puissance distribué pour les réseaux sans fil ad hoc. En outre, dans [40], la fonction d'utilité a été utilisée pour optimiser la valeur de la puissance de transmission pour chaque utilisateur. Dans nos travaux, on adopte une forme similaire de fonction d'utilité dans l'objectif de déterminer d'une façon optimale les valeurs des coefficients d'annulation des différents signaux interférents reçus, et par la suite sélectionner proprement les signaux interférents à annuler. Par conséquent, la maximisation de la fonction d'utilité nette de chaque utilisateur permet d'optimiser son SINR post-IC reçu.

FIGURE 3.1: Courbe représentative de la fonction $U_{m,u}$ ($\alpha_m = 1$).

La fonction d'utilité $U_{m,u}$ capture alors la qualité de service offerte à l'utilisateur. Comme le représente la figure ci-dessus, il est clair qu'en maximisant la fonction d'utilité $U_{m,u}$, l'utilisateur est de plus en plus satisfait de la qualité de service offerte. Cependant, la valeur de la fonction de coût C_u augmente en maximisant la fonction d'utilité $U_{m,u}$. De ce fait, la fonction d'utilité nette $U_{net,u}$ est exprimée comme suit :

$$U_{net,u}(\gamma_u) = \frac{1}{1 + \exp(-\alpha_m \gamma_u)} - \beta_m \gamma_u \quad (3.14)$$

où β_m est le paramètre β correspondant à l'utilisateur MUE.

En utilisant cette expression de la fonction d'utilité nette, la forme analytique suivante du SINR post-IC optimal $\hat{\gamma}_u$ peut être obtenue à partir de l'expression (3.10) et en se servant de [54, 74] :

$$\hat{\gamma}_u = -\frac{1}{\alpha_m} \ln\left(\frac{\alpha_m}{2\beta_m} - 1 - \sqrt{\left(\frac{\alpha_m}{2\beta_m} - 1\right)^2 - 1}\right). \quad (3.15)$$

L'expression finale du coefficient $a_{u,j,r}$ ($j \in J_u$) de l'utilisateur MUE $u \in \mathcal{L}_m$ est présentée ci-dessous :

$$a_{u,j,r} = \frac{1}{j_u P_{u,j,r}} \left[-\frac{\alpha_m}{\ln\left(\frac{\alpha_m}{2\beta_m} - 1 - \sqrt{\left(\frac{\alpha_m}{2\beta_m} - 1\right)^2 - 1}\right)} P_{u,i(u),r} - \sigma_{u,r} \right]. \quad (3.16)$$

Il est à noter que deux conditions doivent être respectées par les équations (3.15) et (3.16). La première condition vérifie que $\left(\frac{\alpha_m}{2\beta_m} - 1\right)^2 - 1 \geq 0$. Afin de respecter cette condition, on doit définir les paramètres α_m et β_m en vérifiant que $\alpha_m \geq 4\beta_m$. De plus, la deuxième condition exige que $\frac{\alpha_m}{2\beta_m} - 1 - \sqrt{\left(\frac{\alpha_m}{2\beta_m} - 1\right)^2 - 1} > 0$. Cette condition est vérifiée pour $\alpha_m > 4\beta_m$. En conclusion, on a intérêt à minimiser assez faible que possible le paramètre α_m afin de maximiser le SINR reçu optimal $\hat{\gamma}_u$, tout en respectant la condition $\alpha_m > 4\beta_m$.

Par conséquent, dans l'étape de simulation des stratégies proposées, on a choisi le paramètre α_m tel que $\alpha_m = 4.5\beta_m$. Ensuite, on a minimisé le paramètre β_m dans le but de maximiser le débit global du réseau HetNet LTE et améliorer la qualité de service offerte à l'utilisateur MUE.

3.2.4.2 Fonction d'utilité et coefficients d'annulation du FUE

D'une façon similaire aux MUEs, on définit pour chaque usager $u \in \mathcal{L}_f$ sa fonction d'utilité $U_{f,u}$ sous la forme suivante [40] :

$$U_{f,u}(\gamma_u) = W \log(1 + \gamma_u) \quad (3.17)$$

où W représente la bande de fréquence du système.

La fonction d'utilité $U_{f,u}$ capture la capacité de Shannon pour cet usager FUE. On trace dans la figure suivante la courbe représentative de cette fonction.

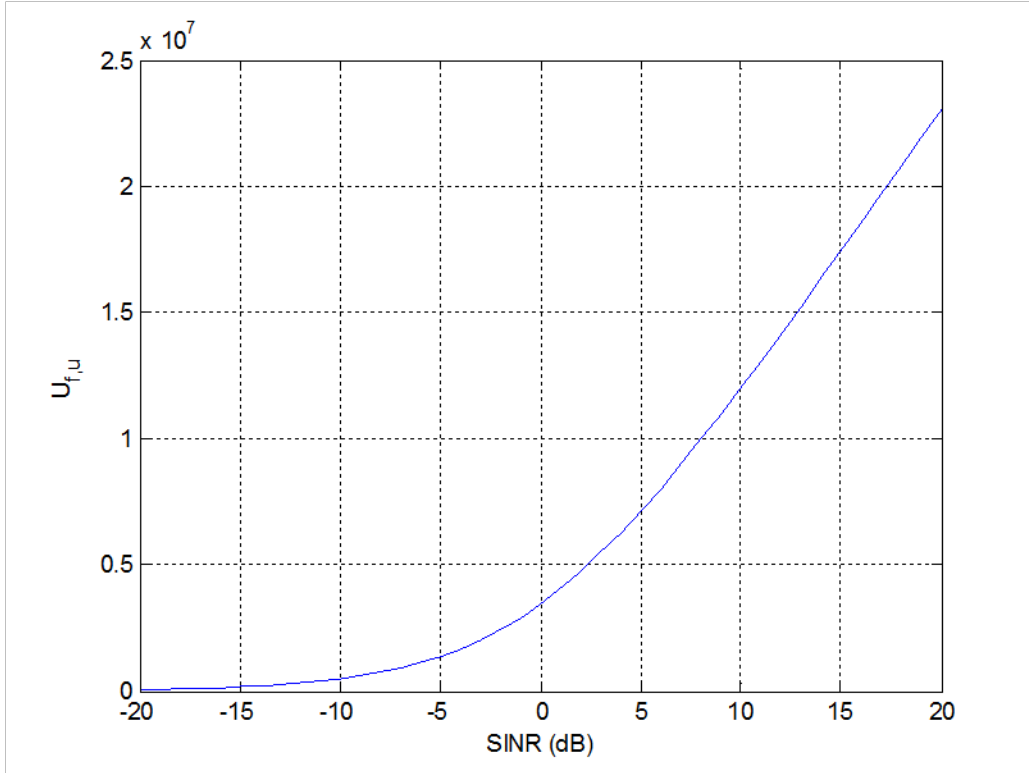


FIGURE 3.2: Courbe représentative de la fonction $U_{f,u}$ ($W = 5$ MHz).

Par conséquent, la fonction d'utilité nette de l'utilisateur $U_{net,u}$ est définie comme suit :

$$U_{net,u}(\gamma_u) = W \log(1 + \gamma_u) - \beta_f \gamma_u \quad (3.18)$$

où β_f est le paramètre β correspondant à l'utilisateur FUE.

L'utilisateur FUE cherche à maximiser sa fonction d'utilité nette afin d'améliorer son débit de connectivité. En utilisant cette expression et l'équation (3.12), on extrait l'expression du coefficient $a_{u,j,r}$ ($j \in J_u$) de l'utilisateur $u \in \mathcal{L}_f$ comme suit :

$$a_{u,j,r} = \frac{1}{j_u P_{u,j,r}} \left[\frac{\beta_f}{W - \beta_f} P_{u,i(u),r} - \sigma_{u,r} \right]. \quad (3.19)$$

En résumé, le principe de base de cette troisième stratégie est de calculer d'une façon optimale les valeurs des coefficients $a_{u,j,r}$ ($j \in J_u$), ce qui mène à une optimisation du SINR reçu. On résume dans ce qui suit cette troisième stratégie.

Algorithme 3.3 Troisième stratégie d'annulation de l'interférence DL

Pour chaque TTI

Pour chaque RB r

- 1- chaque usager $u \in \mathcal{L}$ mesure $P_{u,i(u),r}$, $P_{u,j,r}$ pour $j \in J_u$ et $\sigma_{u,r}$.
- 2- Si l'usager est MUE
 - il calcule les coefficients $a_{u,j,r}$ ($j \in J_u$) en utilisant

$$a_{u,j,r} = \min\left(1, \frac{1}{j_u P_{u,j,r}} \left[-\frac{\alpha_m}{\ln\left(\frac{\alpha_m}{2\beta_m} - 1 - \sqrt{\left(\frac{\alpha_m}{2\beta_m} - 1\right)^2 - 1}\right)} P_{u,i(u),r} - \sigma_{u,r} \right] \right).$$

- il calcule le SINR post-IC reçu en utilisant l'expression

$$\gamma_{u,r} = \frac{P_{u,i(u),r}}{\sum_{j \in J_u} a_{u,j,r} \times P_{u,j,r} + \sigma_{u,r}}.$$

- 3- Si l'usager est FUE
 - il calcule les coefficients $a_{u,j,r}$ ($j \in J_u$) en utilisant

$$a_{u,j,r} = \min\left(1, \frac{1}{j_u P_{u,j,r}} \left[\frac{\beta_f}{W - \beta_f} P_{u,i(u),r} - \sigma_{u,r} \right] \right).$$

- il calcule le SINR post-IC reçu en utilisant l'expression

$$\gamma_{u,r} = \frac{P_{u,i(u),r}}{\sum_{j \in J_u} a_{u,j,r} \times P_{u,j,r} + \sigma_{u,r}}.$$

fin

fin

En conclusion, ces stratégies d'annulation de l'interférence DL ont pour objectifs d'améliorer l'expérience utilisateur et d'éliminer l'impact de l'interférence sur la performance du réseau HetNet LTE. Afin de vérifier la performance des stratégies proposées, on les a implémentées dans notre simulateur du réseau HetNet LTE. On a généré ensuite les résultats des simulations qu'on analysera dans les sections suivantes.

3.3 Implémentation des stratégies

Les trois stratégies d'annulation de l'interférence DL proposées nécessitent un taux minimal d'échange de rapports de mesure entre les usagers et les stations de base. En effet, chaque UE

coopère avec sa cellule servante afin de construire la liste des cellules voisines, et ensuite estimer le pathloss entre cet usager et ses cellules voisines.

En outre, chaque MUE échange des rapports de mesure radio avec la cellule macro à laquelle il est attaché afin de maintenir à jour la liste des cellules voisines. Ce MUE est donc capable d'estimer le gain des canaux en exploitant les pilotes des canaux reçus de la part de ses cellules voisines. Par la suite, l'usager peut donc calculer la puissance reçue de chaque cellule voisine, macro ou femto [54].

Afin d'effectuer les mêmes mesures dans le cas d'un usager FUE, la cellule femto à laquelle il est attaché doit être équipée d'un récepteur DL additionnel qui sert à mesurer les signaux reçus à partir des cellules voisines. Ce récepteur est appelé « HeNB Sniffer » [18]. En effet, la cellule femto utilise ce récepteur pour mesurer la puissance du pilote du signal co-canal reçu (RSRP) qui sert à déterminer la couverture des cellules macros et femtos voisines [18]. De même, les RSRPs des cellules voisines sont mesurés aussi par l'usager HUE et sont reportés par la suite à la cellule femto à laquelle il est attaché. De plus, la cellule femto mesure la puissance de transmission du signal de référence (RSTP) des cellules voisines et estime le pathloss entre ces cellules et son usager HUE [18].

Dans notre simulateur HetNet LTE, on utilise des puissances de transmission fixes pour toutes les stations de base, femtos et macros. De ce fait, chaque UE est capable de calculer la puissance reçue de la part de la cellule à laquelle il est attaché, ainsi que les puissances des signaux interférents reçus des cellules voisines.

Enfin, l'UE utilise la stratégie d'annulation proposée afin de calculer les coefficients d'annulation et ainsi minimiser l'interférence causée par les cellules voisines.

3.4 Évaluation de performances des stratégies

Afin d'analyser la performance des stratégies d'annulation de l'interférence DL proposées et étudier leurs impacts sur la performance du réseau HetNet LTE, on a implémenté ces stratégies dans notre simulateur HetNet LTE au niveau système. On a ensuite considéré différents scénarios de simulation déployant différents nombres de cellules femtos dans le réseau. On a donc utilisé les paramètres de simulation cités dans le tableau ci-après.

3.4.1 Paramètres de simulation

Durant les simulations qui suivent, nous conservons les mêmes paramètres de simulation mentionnés dans le tableau 2.1. Les paramètres de la deuxième et la troisième stratégies sont résumés dans le tableau 3.1 suivant.

Paramètres	Cellule macro	Cellule femto
Paramètre de la 2ème stratégie	$\alpha = 10$	
Paramètres de la 3ème stratégie	$\alpha_m = 4.5\beta_m$	$W = 5\text{MHz} ; \beta_f = 10^4$ [54]

TABLE 3.1: Paramètres de simulation.

3.4.2 Réglage de paramètre

On a déjà mentionné que la performance de la troisième stratégie proposée dépend du réglage de ses paramètres, principalement le paramètre β_m . En effet, ce paramètre reflète la sensibilité du récepteur de l'utilisateur macro aux signaux interférents des cellules voisines. Dans la figure 3.3, on a simulé la performance de la troisième stratégie et on a tracé les courbes de gain en débit du réseau pour les valeurs de β_m suivantes 10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} et 10^{-4} .

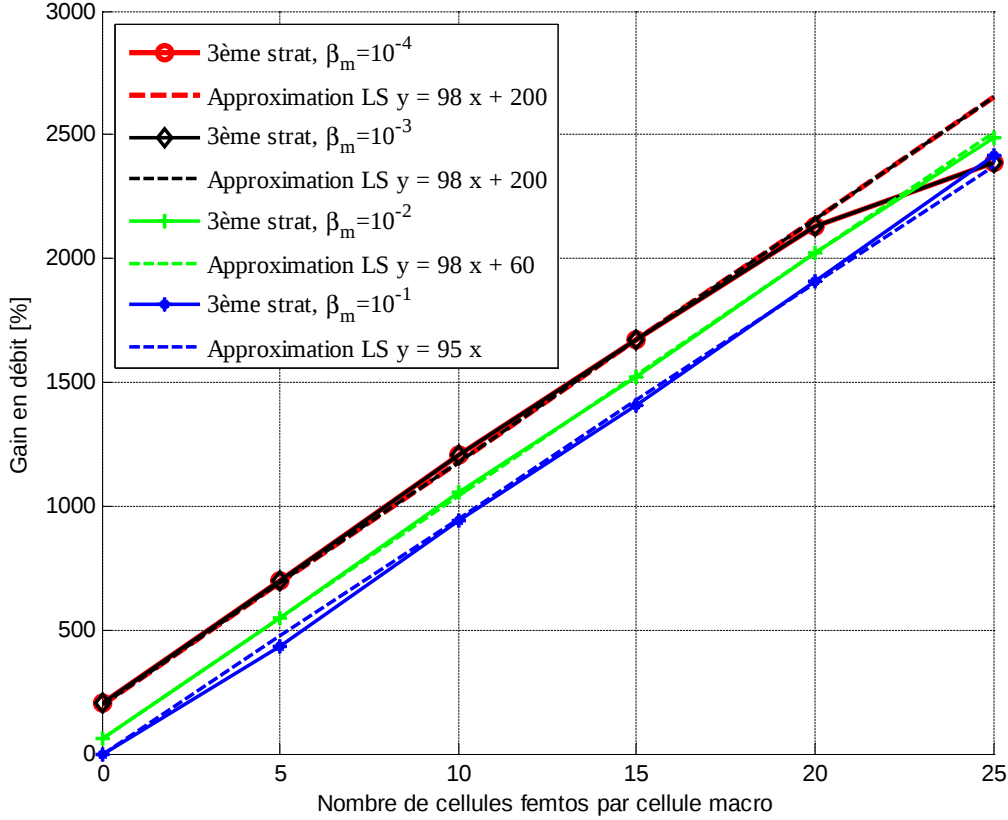


FIGURE 3.3: Gains en débit pour la 3ème stratégie proposée comparés au réseau LTE homogène pour différentes valeurs de β_m .

Les résultats obtenus dans la figure ci-dessus viennent confirmer l'analyse discutée auparavant. En effet, plus la valeur du paramètre est faible, plus le gain en débit du réseau augmente vu que le récepteur de l'utilisateur MUE devient plus sensible, et donc exige l'annulation de plus de signaux interférents. Cependant, cette augmentation du gain n'est pas infinie. En effet, pour des valeurs de β_m inférieures à 10^{-3} , on remarque une saturation du gain en débit, comme le représente les deux courbes confondues (noire et rouge) correspondant respectivement aux valeurs 10^{-3} et 10^{-4} du paramètre β_m . Les résultats obtenus dans la figure 3.3 montrent un gain en débit par rapport au réseau homogène sans annulation d'interférence atteignant 200% en plus d'un extra de 98% par cellule femto additionnelle.

Ces résultats sont confirmés par la figure 3.4 suivante représentant les courbes du débit total du réseau pour les mêmes valeurs du paramètre β_m que celles de la figure précédente.

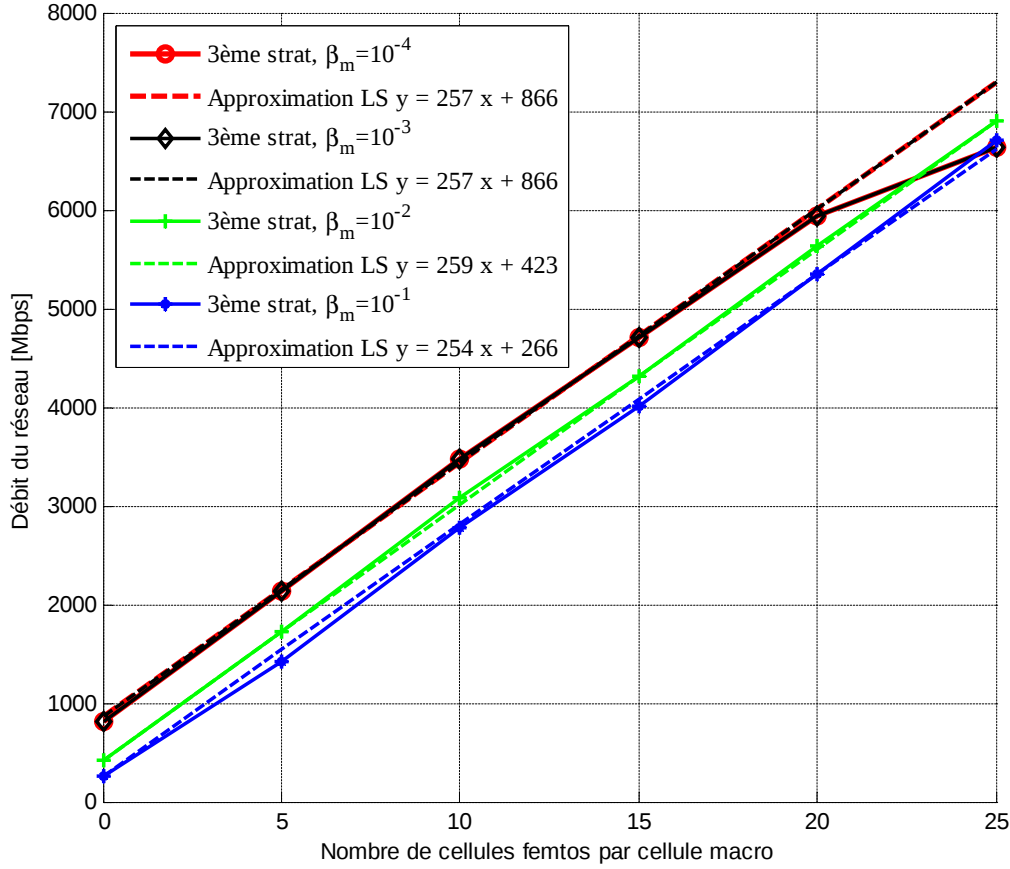


FIGURE 3.4: Débits du réseau pour la 3ème stratégie proposée comparés au réseau LTE homogène pour différentes valeurs de β_m .

Par conséquent, on fixe le paramètre β_m à la valeur 10^{-3} dans les simulations du reste de notre travail.

3.4.3 Performance globale du réseau

Dans une première étape, on compare le débit total du réseau HetNet LTE obtenu en déployant différents nombres de cellules femtos aux résultats obtenus dans le chapitre précédent. En effet, on a simulé plusieurs scénarios comme il est présenté dans la section 3.2.3 précédent. On mesure le débit total du réseau et on le compare à celui obtenu avant l'implémentation des stratégies d'annulation de l'interférence DL. Les résultats obtenus sont présentés dans les figures suivantes.

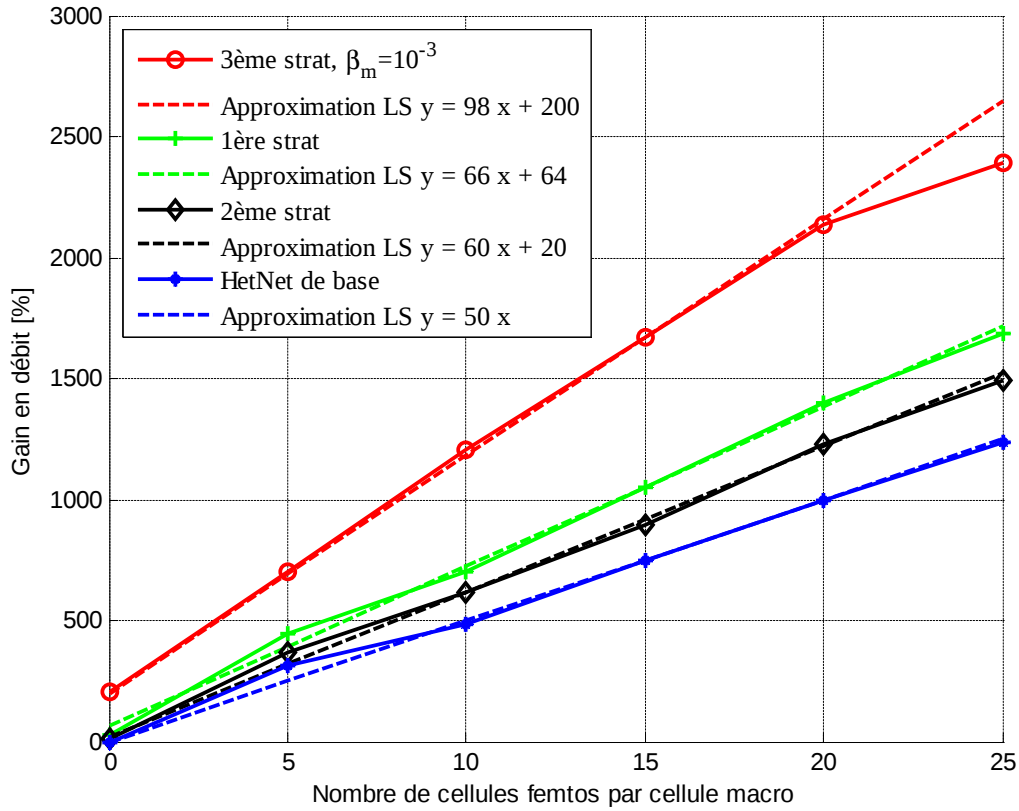


FIGURE 3.5: Gains en débit pour les trois stratégies d'annulation proposées comparés au réseau LTE homogène.

La figure 3.5 représente les courbes du gain en débit en déployant les trois stratégies d'annulation de l'interférence DL, comparé au réseau référence HetNet basique ne déployant aucune annulation d'interférence (courbe bleue). Il est clair à partir de la figure ci-dessus que les trois stratégies proposées permettent d'améliorer la performance globale du réseau. Cependant, les deux premières stratégies (les courbes noire et verte) offrent une amélioration légère du débit total du réseau HetNet LTE par rapport au résultat obtenu avant le déploiement de ces stratégies. De plus, on remarque que la troisième stratégie proposée représente une meilleure performance. En effet, en fixant le paramètre β_m à la valeur 10^{-3} , on réussit à presque doubler le gain en débit réseau. Ceci est dû à la réduction optimale de l'interférence que subit chaque usager.

Des résultats similaires sont obtenus en traçant les courbes représentatives du débit total du réseau HetNet LTE dans la figure 3.6 suivante.

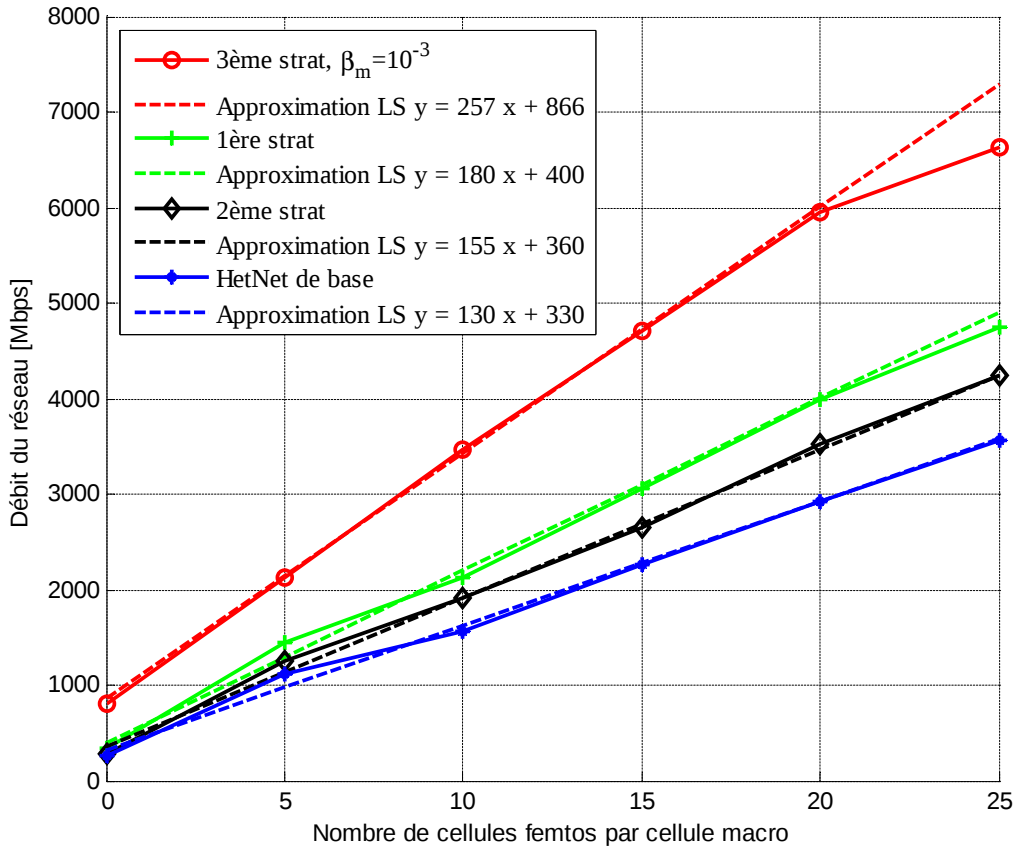


FIGURE 3.6: Débits du réseau pour les trois stratégies d'annulation proposées comparés au réseau LTE homogène.

On constate à partir de la figure ci-dessus que même en absence de cellules femtos dans le réseau (réseau homogène), la troisième stratégie proposée permet d'améliorer le débit total des cellules macros du réseau. En effet, elle permet au récepteur de l'utilisateur MUE de réduire l'interférence causée par les secteurs des cellules macros voisines.

On peut donc conclure que la troisième stratégie d'annulation de l'interférence DL représente la solution optimale offrant de meilleurs résultats. Cependant, comme on l'a déjà mentionné auparavant, la performance de cette stratégie dépend principalement de la configuration de ses paramètres. Par conséquent, dans la suite de ce travail, on s'intéresse seulement à la troisième stratégie proposée, qu'on nomme stratégie DL-IC, afin d'étudier plus en détails sa performance.

En outre, on compare la performance de la stratégie DL-IC proposée à celle de l'algorithme de contrôle de puissance DL (DL-PC) de 3GPP [75]. En effet, cet algorithme vise à contrôler et à réduire l'interférence DL dans un réseau LTE HetNet en réduisant la puissance de transmission des cellules femtos à un niveau compris entre la puissance de transmission minimale P_{min} et la puissance de transmission maximale P_{max} . On distingue deux types de contrôle de puissance DL : semi-statique et dynamique. Le principe de base du contrôle de puissance dynamique comme discuté

dans la standardisation 3GPP est présenté par l'équation suivante [75] :

$$P_{DL} = \max(P_{min}, \min(P_{max}, P_0 + P_{offset})) \quad (3.20)$$

où P_{DL} représente la puissance de transmission de la cellule femto, P_0 représente l'interférence reçue mesurée par l'utilisateur FUE attaché à cette cellule et P_{offset} est basé sur le pathloss entre cette cellule femto et son usager FUE. Les valeurs des deux puissances P_{min} et P_{max} sont fixées à -10 dBm et 20 dBm , respectivement

Après l'implémentation de l'algorithme dynamique de contrôle de puissance DL, on trace sa courbe de gain en débit, et on la compare avec celles obtenues sans annulation d'interférence, ainsi qu'avec la courbe correspondante à la stratégie DL-IC proposée. Les résultats sont présentés dans la figure suivante.

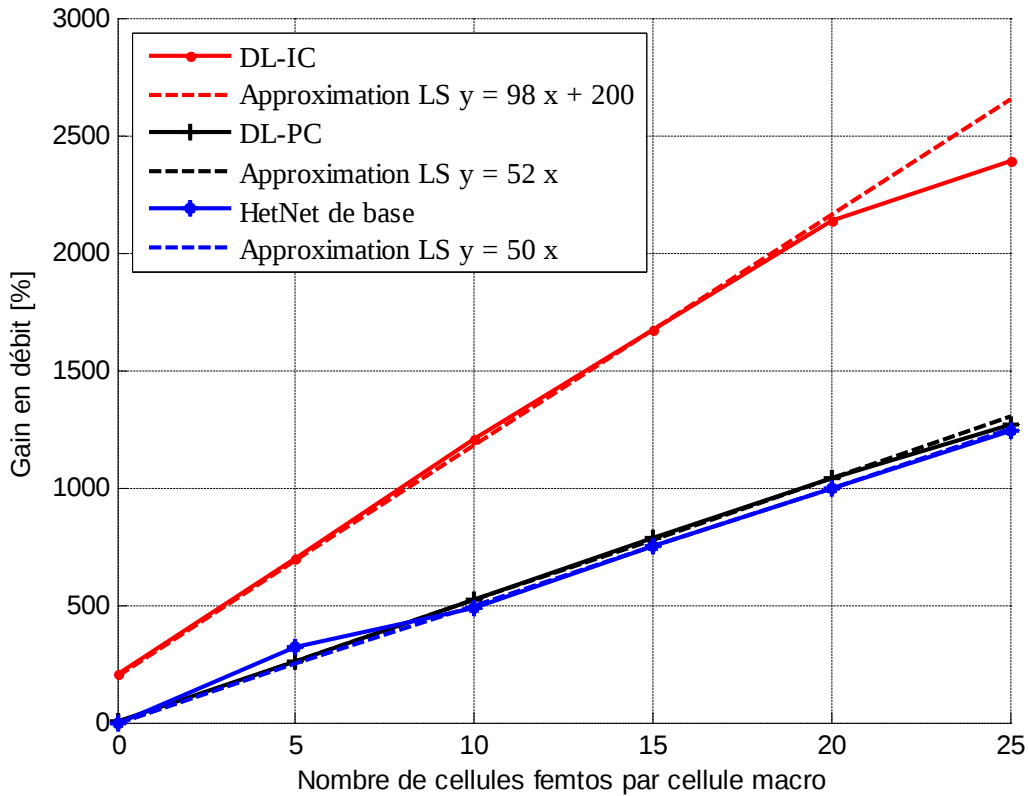


FIGURE 3.7: Débit total du réseau pour l'algorithme DL-PC et la stratégie DL-IC proposée ($\beta_m = 10^{-3}$).

Il est clair à partir de la figure 3.7 que la performance de la stratégie DL-IC proposée est largement plus importante que celle de l'algorithme DL-PC. En effet, ce dernier ne présente qu'une légère amélioration du gain en débit du réseau comparé au scénario référence HetNet de base ne déployant ni contrôle de puissance ni annulation d'interférence.

3.4.4 Contraintes d'annulation

D'après les premiers résultats présentés dans les sections précédentes, on remarque que la stratégie DL-IC garantit la meilleure performance du réseau et permet d'atteindre le SINR optimal pour chaque usager. En effet, la stratégie DL-IC permet au récepteur d'annuler un nombre optimal de signaux interférents reçus par l'utilisateur. On désigne ce nombre de signaux à annuler par le terme « contraintes d'annulation ». Ce nombre de contraintes d'annulation varie d'un usager à un autre, selon l'interférence que subit cet usager.

On trace alors dans la figure suivante les fonctions CDF des contraintes d'annulation pour différents scénarios de simulation déployant différents nombres de cellules femtos.

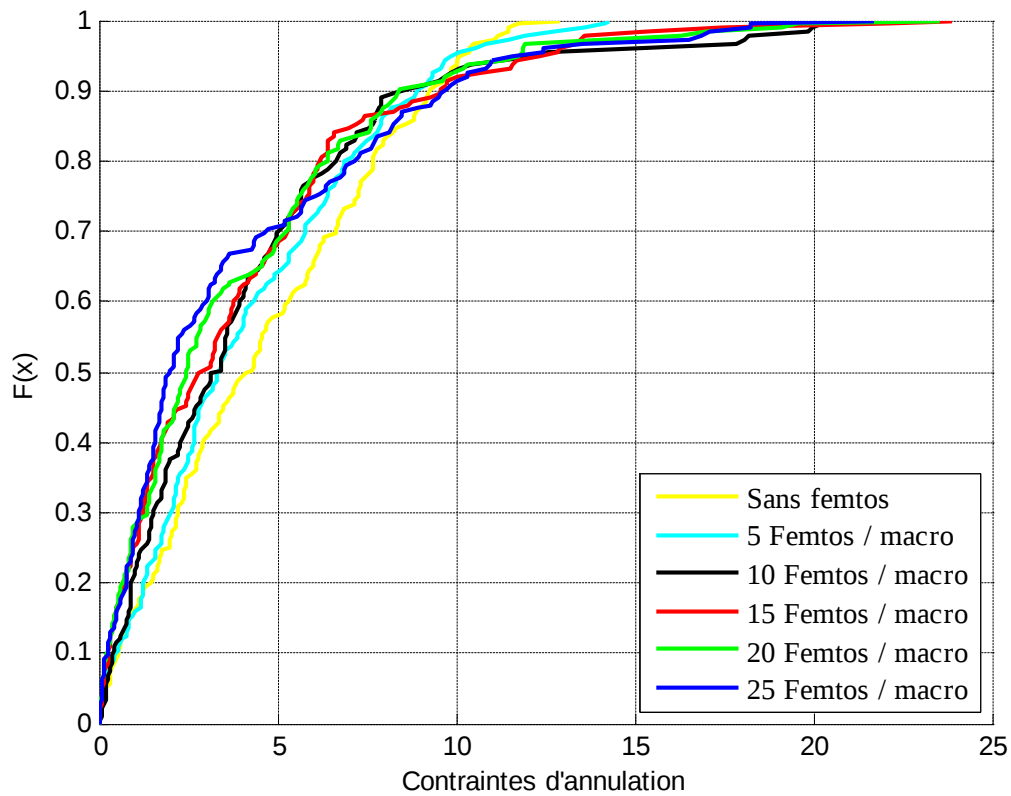


FIGURE 3.8: Fonctions CDF des contraintes d'annulation pour différents scénarios de déploiement de cellules femtos.

On remarque à partir de la figure ci-dessus que la stratégie DL-IC est plus performante dans un environnement dense en cellules femtos, que dans un milieu à faible densité. En effet, en présence d'un grand nombre de cellules femtos au voisinage de l'utilisateur, l'algorithme permet d'éliminer les signaux les plus interférents.

Par conséquent, la performance du réseau peut être améliorée efficacement lorsque le réseau est caractérisé par une forte densité de cellules femtos, qui est le cas échéant dans un réseau HetNet LTE.

3.4.5 Optimisation de la stratégie DL-IC

Il est clair que le processus d'annulation est de plus en plus complexe en augmentant le nombre de signaux interférents à annuler. En effet, le nombre de contraintes d'annulation détermine le degré de complexité d'implémentation de la stratégie DL-IC proposée. On cherche alors dans cette section à optimiser la performance de cette stratégie. En effet, on propose d'imposer deux bornes, supérieure et inférieure, pour les valeurs des coefficients d'annulation $a_{u,j,r}$. Par conséquent, la stratégie DL-IC proposée n'exécute pas l'annulation des signaux interférents correspondant à des coefficients supérieurs à la valeur de la borne supérieure. De même, la valeur minimale du coefficient d'annulation ne peut être inférieure à la borne inférieure imposée.

On constate que les valeurs des deux bornes supérieure et inférieure affectent la performance de la stratégie DL-IC. Par conséquent, on cherche à déterminer les valeurs des deux bornes qui ne dégradent pas la performance du réseau, principalement en termes de gain en débit du réseau.

3.4.5.1 La borne supérieure

Dans une première étape, on cherche à déterminer la valeur de la borne supérieure, notée A_u , qui permet de simplifier l'implémentation de l'algorithme tout en préservant un meilleur gain en débit du réseau. En effet, les signaux interférents ayant des coefficients d'annulation supérieures à la borne A_u ne seront pas annulés. Par la suite, cette borne supérieure sera traduite dans la stratégie d'annulation de l'interférence DL par la condition suivante :

$$\text{Si } a_{u,j,r} > A_u \quad \text{alors} \quad a_{u,j,r} = 1, \quad j \in J_u \quad \text{et} \quad u \in \mathcal{L}$$

Cette borne supérieure reflète la complexité de la stratégie DL-IC. En outre, une valeur de la borne supérieure proche de 1 augmente le nombre de signaux à annuler, ce qui rend le processus d'annulation d'interférence plus complexe. Par contre, plus la valeur de cette borne est proche de 0, moins on annule de signaux interférents, ce qui risque de ne pas diminuer l'interférence assez suffisamment pour atteindre le SINR optimal pour chaque usager.

Afin de déterminer la valeur optimale de A_u , on procède à des simulations en utilisant les valeurs de A_u suivantes 10^{-1} , 10^{-2} et 10^{-3} . On mesure le gain en débit du réseau pour ces scénarios. Ensuite, on trace les courbes de gain en débit correspondantes et on les compare avec celle obtenue dans le cas où aucune borne supérieure n'est utilisée (c.-à-d. $A_u = 1$). On compare aussi les résultats obtenus avec la courbe du gain en débit du réseau HetNet de base. L'ensemble des courbes obtenues sont représentées dans la figure suivante.

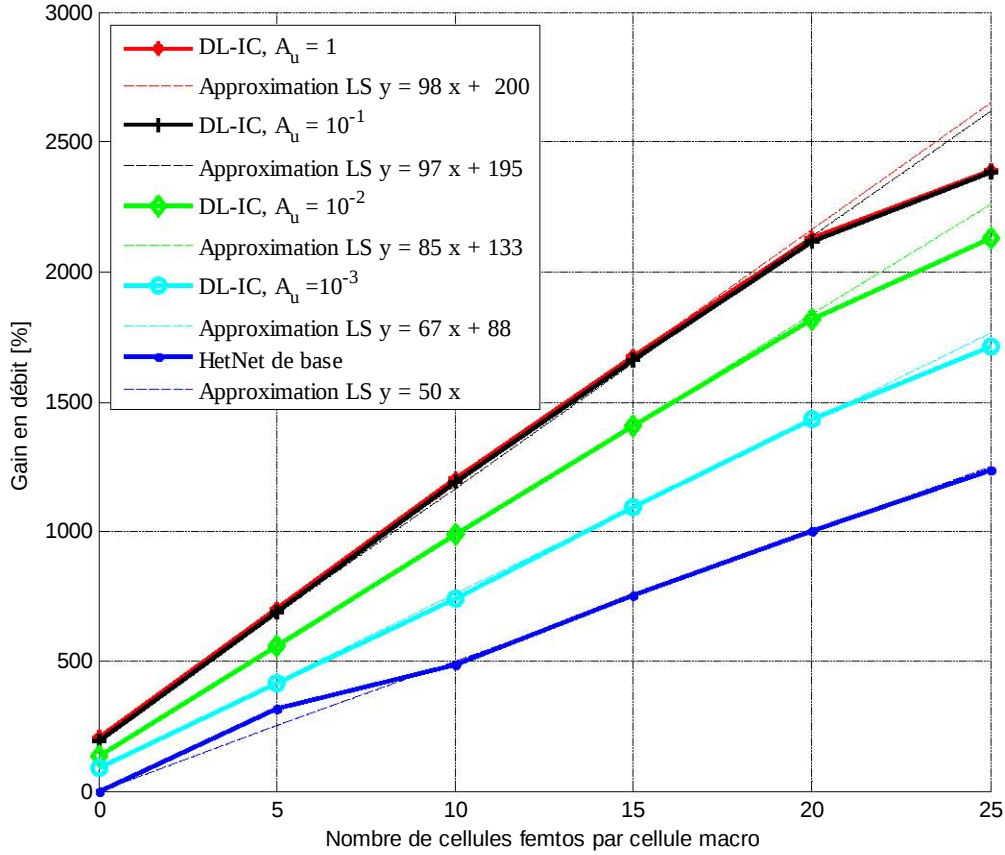


FIGURE 3.9: Gains en débit du réseau comparé au réseau LTE homogène pour différentes valeurs de A_u ($\beta_m = 10^{-3}$).

On remarque à partir de la figure 3.9 que, tant que la valeur de A_u est supérieure à 10^{-2} , il n'y a pas de détérioration de performance d'annulation comparée à l'annulation parfaite ($A_u = 1$). Pour $A_u = 10^{-2}$, les gains en débit par rapport à réseau LTE homogène sans annulation d'interférence sont de l'ordre de 133% plus un extra de 85% par cellule femto additionnelle. Comparé au réseau LTE HetNet de base sans annulation d'interférence, ces gains de l'ordre de 133% en plus d'un extra de 35% par cellule femto additionnelle restent toujours prometteurs. Par conséquent, en réglant la valeur de A_u à 10^{-2} , on réussit à réduire la complexité d'implémentation de la stratégie DL-IC proposée tout en préservant des gains en débit prometteurs.

3.4.5.2 La borne inférieure

D'une façon similaire à la borne supérieure, on cherche dans ce paragraphe à déterminer la valeur optimale de la borne inférieure. En effet, cette valeur détermine la précision du processus d'annulation. En outre, sans déployer une borne inférieure, la plus petite valeur que peut avoir le coefficient d'annulation est égale à 0, équivalent à une annulation parfaite. Or, une annulation parfaite d'un signal interférent est pratiquement impossible à réaliser à cause des imperfections de

l'estimation du canal et les erreurs de reconstruction du signal. On insère donc une borne inférieure, notée A_l , pour les coefficients d'annulation afin de prendre en considération ces imperfections lors du calcul des taux d'annulation. Par la suite, cette borne inférieure sera traduite dans la stratégie DL-IC proposée par l'expression suivante :

$$a_{u,j,r} = \max(A_l, a_{u,j,r}) , \quad j \in J_u \quad \text{et} \quad u \in \mathcal{L}$$

Afin de déterminer la valeur optimale de A_l , on a procédé à des simulations de l'algorithme d'annulation pour les valeurs de A_l suivantes $A_l = 10^{-4}$, 10^{-3} et 10^{-2} . Dans ces simulations, on a choisi de ne pas imposer de borne supérieure (i.e $A_u = 1$) afin d'évaluer l'impact de A_l séparément. Comme pour le cas de la borne supérieure, on trace les courbes de gain en débit des différents scénarios de simulation dans la figure suivante.

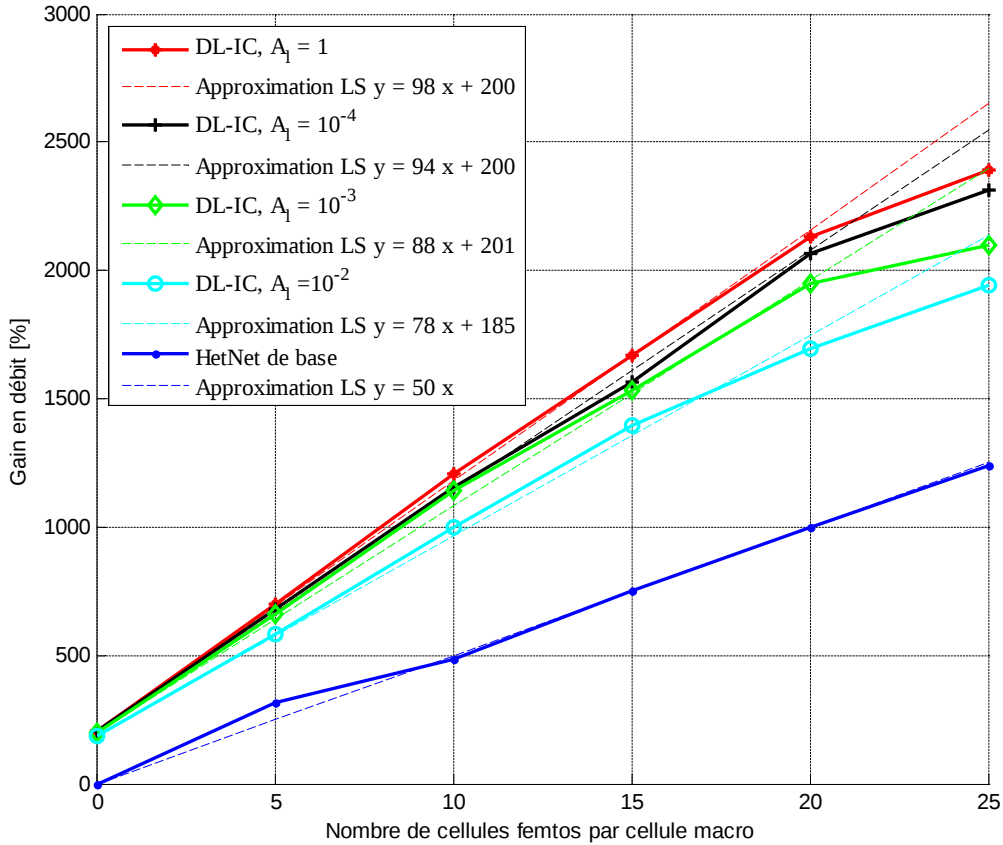


FIGURE 3.10: Gains en débit du réseau comparé au réseau LTE homogène pour différentes valeurs de A_l ($\beta_m = 10^{-3}$, $A_u = 1$).

À partir de la figure 3.10, on peut constater que plus on augmente A_l , plus le gain en débit se détériore. En effet, en fixant le taux maximal d'annulation à -20 dB ($A_l = 10^{-2}$), le gain en débit obtenu par rapport au réseau homogène sans annulation d'interférence de l'ordre de 185% plus un extra de 78% par cellule femto additionnelle est jugé prometteur.

3.4.5.3 Les deux bornes conjointement

Après avoir évalué l'impact de la borne supérieure et de la borne inférieure séparément, on étudie dans ce paragraphe la performance de la stratégie DL-IC proposée en déployant les deux bornes conjointement. La stratégie DL-IC proposée est alors modifiée afin d'insérer ces deux bornes comme suit :

Algorithme 3.4 La stratégie DL-IC proposée optimisée

Pour chaque TTI

Pour chaque RB r

- 1- chaque usager $u \in \mathcal{L}$ mesure $P_{u,i(u),r}$, $P_{u,j,r}$ pour $j \in J_u$ et $\sigma_{u,r}$.
- 2- Si l'utilisateur est MUE
 - il calcule les coefficients $a_{u,j,r}(j \in J_u)$ en utilisant

$$a_{u,j,r} = \min\left(1, \frac{1}{j_u P_{u,j,r}} \left[-\frac{\alpha_m}{\ln\left(\frac{\alpha_m}{2\beta_m} - 1 - \sqrt{\left(\frac{\alpha_m}{2\beta_m} - 1\right)^2 - 1}\right)} P_{u,i(u),r} - \sigma_{u,r} \right] \right)$$

- Si $a_{u,j,r} > A_u$ alors $a_{u,j,r} = 1$
- $a_{u,j,r} = \max(A_l, a_{u,j,r})$
- il calcule le SINR reçu en utilisant l'expression

$$\gamma_{u,r} = \frac{P_{u,i(u),r}}{\sum_{j \in J_u} a_{u,j,r} \times P_{u,j,r} + \sigma_{u,r}}$$

- 3- Si l'utilisateur est FUE
 - il calcule les coefficients $a_{u,j,r}(j \in J_u)$ en utilisant

$$a_{u,j,r} = \min\left(1, \frac{1}{j_u P_{u,j,r}} \left[\frac{\beta_f}{W - \beta_f} P_{u,i(u),r} - \sigma_{u,r} \right] \right)$$

- Si $a_{u,j,r} > A_u$ alors $a_{u,j,r} = 1$
- $a_{u,j,r} = \max(A_l, a_{u,j,r})$
- il calcule le SINR reçu en utilisant l'expression

$$\gamma_{u,r} = \frac{P_{u,i(u),r}}{\sum_{j \in J_u} a_{u,j,r} \times P_{u,j,r} + \sigma_{u,r}}$$

fin

fin

Afin d'évaluer l'impact des bornes supérieure et inférieure, on a implémenté la stratégie DL-IC optimisée dans le simulateur HetNet LTE. On a simulé par la suite les scénarios de simulation déployant différents nombres de cellules femtos par macro, tout en fixant la borne supérieure à $A_u = 10^{-2}$ et en variant la borne inférieure entre les valeurs suivantes $A_l = 10^{-4}, 10^{-3}$ et 10^{-2} . Les courbes de gain en débit résultantes sont représentées dans la figure suivante.

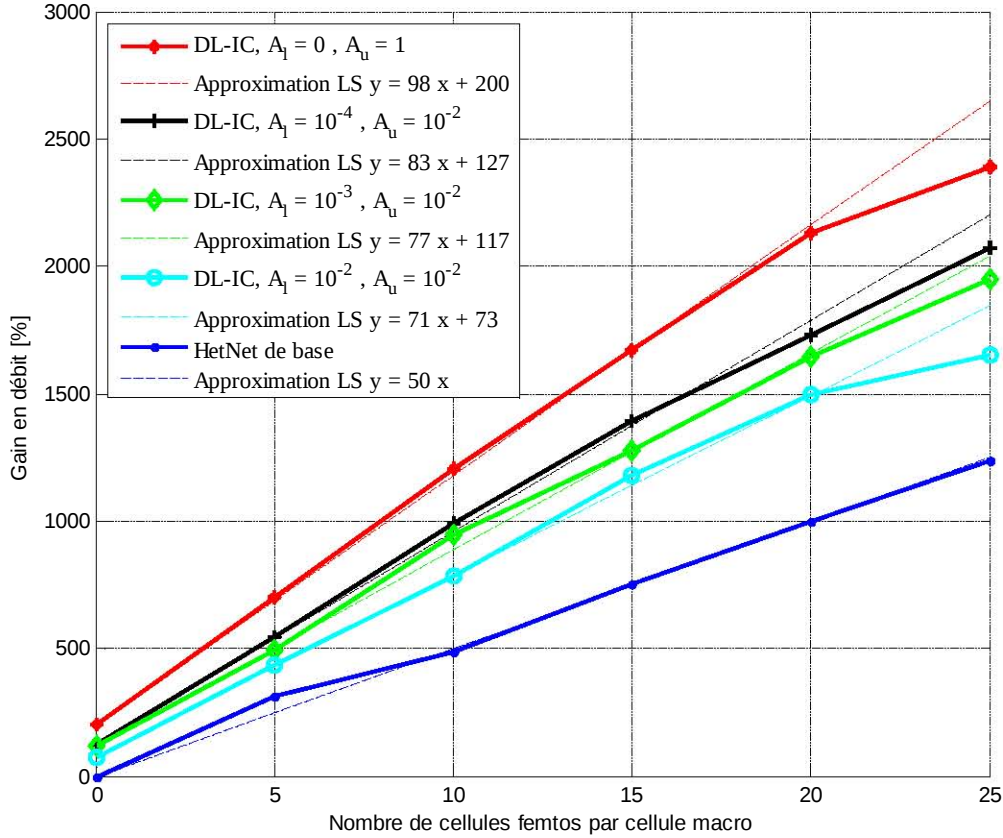


FIGURE 3.11: Gains en débit du réseau comparé au réseau LTE homogène pour différentes valeurs de A_l ($A_u = 10^{-2}$).

D'après la figure 3.11, on remarque que les gains en débit du réseau obtenus sont satisfaisants comparés à la performance du réseau LTE homogène sans annulation d'interférence. En effet, en fixant la valeur de la borne supérieure A_u à 10^{-2} et en imposant la borne inférieure A_l à 10^{-2} , on obtient un gain en débit de l'ordre de 73% en plus d'un extra de 71% par station de base femto additionnelle. Comparé au réseau HetNet LTE de base sans annulation d'interférence, ce gain reste toujours important en atteignant 73% en plus d'un extra de 31% par cellule femto additionnelle.

3.4.5.4 Les bornes et les contraintes d'annulation

Dans ce paragraphe, on étudie l'impact d'imposition des bornes supérieure et inférieure sur les contraintes d'annulation.

En effet, comme on l'a déjà mentionné, la borne inférieure reflète le degré de précision du processus d'annulation des signaux interférents. Elle permet de définir un taux minimal de réduction de la puissance interférente reçue, et n'a aucun effet sur le nombre de contraintes d'annulation.

Par contre, la borne supérieure reflète la complexité de la stratégie DL-IC proposée. En outre, elle permet de réduire le nombre de contraintes d'annulation pour chaque usager lors du processus d'annulation des signaux interférents.

Par conséquent, on a effectué des simulations pour différentes valeurs de $A_u = 1, 10^{-1}$ et 10^{-2} . On a tracé par la suite les fonctions CDF du nombre de contraintes d'annulation pour différents scénarios déployant différents nombres de cellules femtos par cellule macro. Les résultats sont représentés dans la figure suivante.

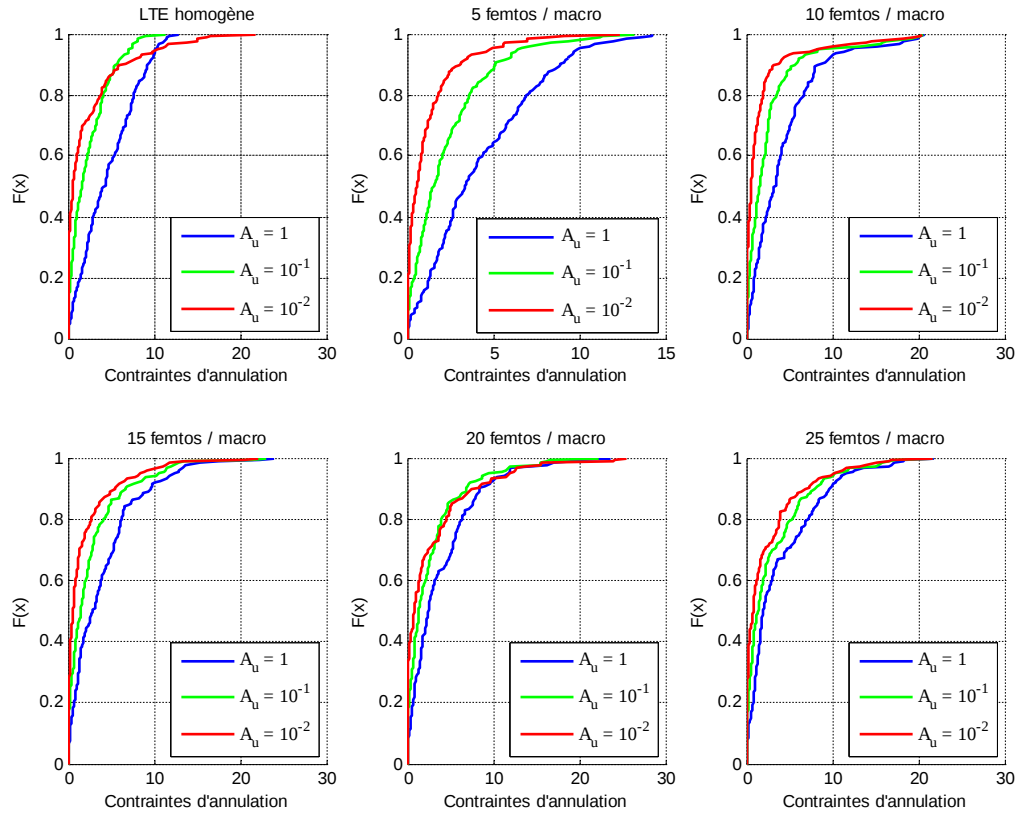


FIGURE 3.12: Fonctions CDF des contraintes d'annulation de la stratégie DL-IC optimisée.

A partir de la figure 3.12, on remarque que la diminution de la valeur de la borne supérieure diminue le nombre de contraintes d'annulation, ce qui diminue la complexité de l'algorithme d'annulation proposé. De plus, les résultats obtenus confirment ce qui a été mentionné auparavant concernant la performance de la stratégie DL-IC proposée. En effet, il est clair que la stratégie DL-IC est plus efficace dans un environnement dense en cellules femtos, ce qui est le cas pour le réseau HetNet LTE.

3.4.5.5 Nombre de contraintes d'annulation fixe

Dans ce paragraphe, on présente une deuxième stratégie de sélection de signaux interférents à annuler. En effet, cette stratégie se démarque par la simplicité de son implémentation, comparée à celle se basant sur la borne supérieure.

Le concept de base de cette deuxième stratégie consiste à choisir un nombre fixe de signaux interférents à annuler, noté N_c . En outre, chaque usager se base sur les valeurs des coefficients d'annulation calculées en utilisant la stratégie DL-IC proposée pour annuler seulement les N_c signaux les plus interférents correspondant aux N_c coefficients les plus faibles. Les autres signaux interférents ne subiront aucun processus d'annulation.

En adoptant ce principe simple de sélection de signaux interférents à annuler, l'implémentation de la stratégie DL-IC proposée est désormais caractérisée par une complexité plus faible. Cependant, le choix du nombre de contraintes d'annulation N_c caractérise la performance du réseau. En effet, une valeur très faible de N_c cause une détérioration majeure de la performance du réseau, tandis qu'une valeur importante de N_c augmente de plus en plus la complexité d'implémentation.

Par conséquent, on étudie à travers différents scénarios de simulation l'impact du choix de la valeur de N_c . En outre, on mesure le gain en débit du réseau pour différentes valeurs de $N_c = 4, 6$ et 10 , avec deux différents niveaux de précision d'annulation ($A_l = 0$ et $A_l = 10^{-2}$). Les résultats obtenus sont présentés dans les deux figures suivantes.

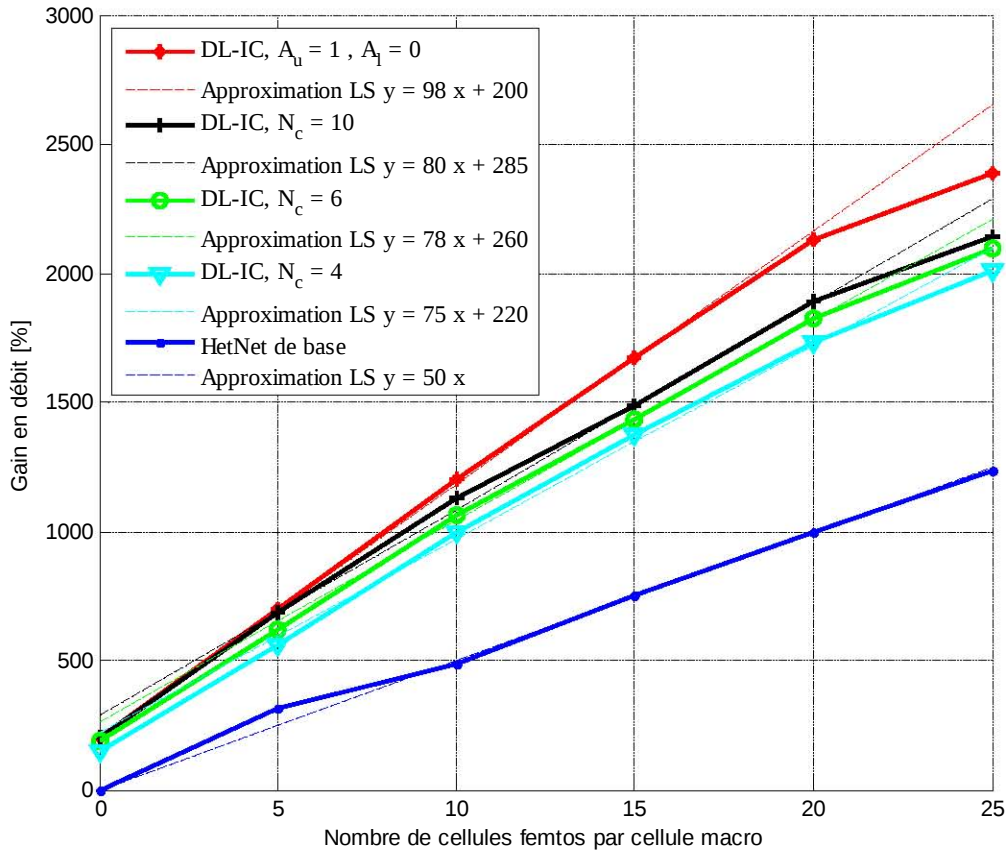


FIGURE 3.13: Gains en débit du réseau comparé au réseau LTE homogène pour différentes valeurs de N_c ($A_I = 0$).

A partir de la figure 3.13, il est clair que la courbe de gain en débit est de plus en plus proche de celle de l'annulation parfaite de l'interférence DL en augmentant la valeur de N_c . Cependant, cette amélioration de performance du réseau est accompagnée par une augmentation de la complexité d'implémentation de la stratégie DL-IC proposée. Par contre, en fixant par exemple le nombre de contraintes d'annulation à 4, on réussit à améliorer le gain en débit du réseau de 220% en plus d'un extra de 75% par cellule femto additionnelle, comparé au réseau LTE homogène sans annulation d'interférence.

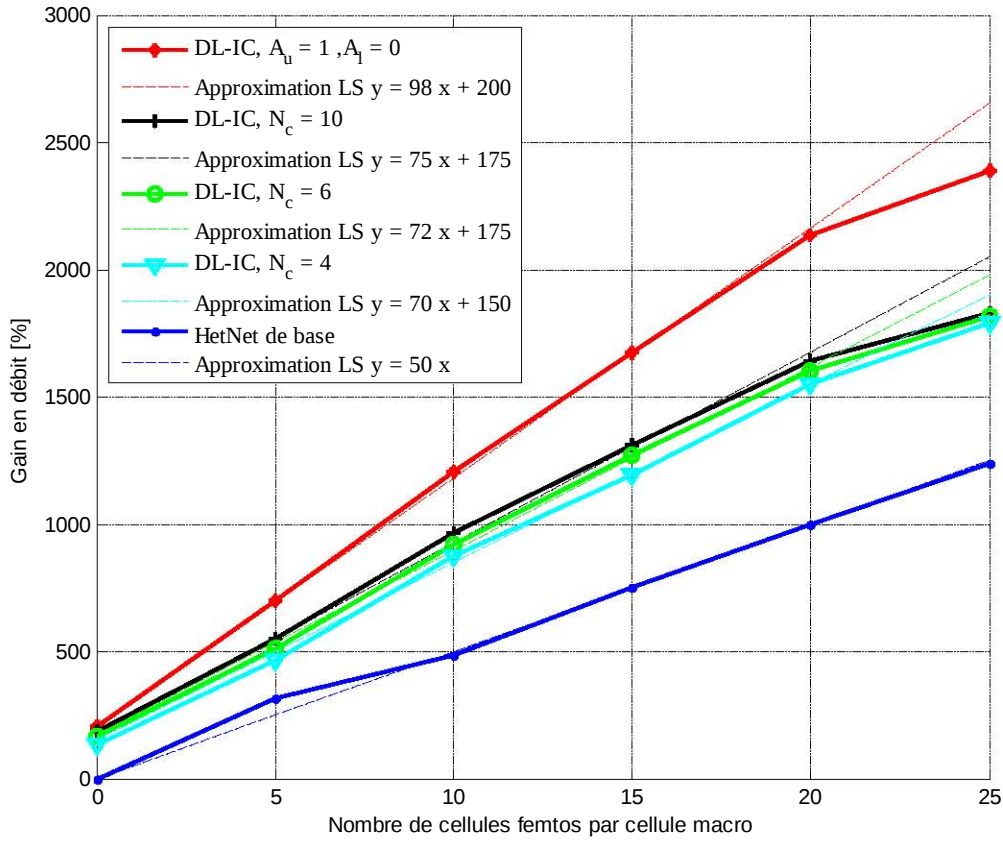


FIGURE 3.14: Courbes du gain en débit pour différentes valeurs de N_c ($A_l = 10^{-2}$).

En diminuant le processus d'annulation parfaite à une annulation avec un taux maximal de -20 dB (i.e. $A_l = 10^{-2}$), les résultats obtenus représentés dans la figure 3.14 montrent qu'on a toujours une amélioration de la performance du réseau. Cependant, cette amélioration est légèrement moins importante que le cas précédent, tout en conservant un gain meilleur que celui obtenu dans le réseau HetNet LTE sans annulation d'interférence. En effet, les résultats montrent qu'annulant au plus 4 signaux interférents par usager, on obtient un gain en débit de l'ordre de 150% plus un extra de 70% par cellule femto additionnelle. On réussit alors à diminuer la complexité d'implémentation de la stratégie DL-IC proposée tout en préservant une amélioration de la performance du réseau HetNet LTE en termes de gain en débit.

Conclusion

Dans ce chapitre, on a proposé trois stratégies d'annulation de l'interférence DL. Ces stratégies calculent des coefficients d'annulation correspondant aux signaux interférents reçus par l'utilisateur.

On a prouvé par les travaux de simulation que la troisième stratégie, nommée stratégie DL-IC, est la plus performante parmi les stratégies proposées. De même, on a vu que cette stratégie permet d'améliorer la performance du réseau et offre une meilleure qualité de service aux usagers en se

basant sur la maximisation de fonctions d'utilité lors du calcul des coefficients d'annulation. Ensuite, on a apporté des modifications dans la stratégie DL-IC proposée afin de réduire et simplifier son implémentation tout en offrant des performances satisfaisantes.

Conclusion générale

Le réseau HetNet LTE est une solution adoptée par le groupe 3GPP afin de résoudre les problèmes de limite de capacité du réseau et de zones de mauvaise couverture. En effet, le concept de cellule femto a été intégré dans le système LTE et les versions qui le succèdent tel que le système LTE-Advanced. Le système LTE version 10 adopte en fait le déploiement des réseaux HetNet qui combinent des cellules à faible puissance de transmission et à couverture étroite telles que les cellules femtos avec la couche de cellules macros. La cellule femto est conçue pour servir un nombre limité d'utilisateurs dans un environnement résidentiel ou une petite entreprise. Le point d'accès femto est donc installé dans une résidence afin de renforcer le signal du réseau dans cette région locale. Par conséquent, le réseau HetNet est caractérisé par des gains en débit et une augmentation de la capacité totale du réseau par rapport au réseau LTE homogène.

Dans la première partie de notre travail, nous avons adapté et validé le simulateur LTE au niveau système pour supporter la configuration du réseau HetNet LTE déployant deux couches de cellules macros et femtos. On a prouvé à travers des simulations au niveau système une amélioration de la capacité du réseau HetNet LTE en termes de gain en débit. Le réseau HetNet LTE offre donc une amélioration du débit total du réseau ainsi que la qualité du lien de communication avec le client.

Cependant, l'insertion de cette nouvelle couche de cellules est une source d'interférence DL qui peut dégrader la qualité de service offerte au client. Par conséquent, on a proposé dans la deuxième partie de ce mémoire une stratégie d'annulation de l'interférence DL (DL-IC). Cette stratégie se base sur le concept de fonctions d'utilité permettant de relaxer les coefficients d'annulation dans le but de réduire les coûts qui résultent des efforts d'annulation tout en maximisant le SINR, la qualité de service et le débit. Les simulations au niveau système montrent que cette stratégie permet de réduire de façon significative l'impact de l'interférence DL et d'améliorer la performance du réseau HetNet LTE tout en minimisant le degré de complexité d'implémentation de la stratégie. En effet, les gains en débit obtenus par la stratégie DL-IC peuvent atteindre jusqu'à 200% par rapport au réseau LTE homogène sans annulation d'interférence plus un extra de 48% par cellule femto supplémentaire par rapport à un réseau HetNet LTE de base sans annulation d'interférence.

La stratégie d'annulation d'interférence proposée DL-IC peut être améliorée dans de futurs travaux afin d'inclure par exemple dans le processus d'annulation les signaux interférents des cellules picos voisines déployées aussi dans le réseau HetNet LTE.

Bibliographie

- [1] 3GPP : *<http://www.3gpp.org/About-3GPP>*.
- [2] 3GPP : *<http://www.3gpp.org/article/lte>*.
- [3] 3GPP : *UTRA-UTRAN Long Term Evolution (LTE) and 3GPP System Architecture Evolution (SAE)*; Techn. Ber.
- [4] 3GPP : *TR 25.996 V8.0.0 Spatial channel model for Multiple Input Multiple Output (MIMO) simulations (Release 8)*; Techn. Ber. ; 2008.
- [5] 3GPP : *TR 36.902 V1.0.0 Self-configuring and self-optimizing network use cases and solutions (release 8)*; Techn. Ber. ; Février 2008.
- [6] 3GPP : *TS 36.201 V8.3.0 Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); LTE physical layer; General description*; Techn. Ber. ; 2009.
- [7] 3GPP : *TS 36.211 V8.9.0 Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation*; Techn. Ber. ; 2009.
- [8] 3GPP : *TS 36.213 V8.8.0 Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures*; Techn. Ber. ; 2009.
- [9] 3GPP : *TS 36.300 V9.2.0 Technical Specification Group Radio Access Network*; Techn. Ber. ; Décembre 2009.
- [10] 3GPP : *TS 36.300 V9.2.0 Technical Specification Group Radio Access Network*; Techn. Ber. ; Décembre 2009.
- [11] 3GPP : *TS 36.331 V8.5.0 Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Resource Control (RRC); Protocol specification*; Techn. Ber. ; Mars 2009.
- [12] 3GPP : *TS 36.423 V9.0.0 Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); X2 application protocol (X2AP) (Release 10)*; Techn. Ber. ; Décembre 2009.
- [13] 3GPP : *TR 36.814 V9.0.0 Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Further advancements for E-UTRA physical layer aspects (Release 9)*; Techn. Ber. ; Mars 2010.
- [14] 3GPP : *TR 36.942 V8.3.0 Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Frequency (RF) system scenarios (Release 8)*; Techn. Ber. ; Septembre 2010.
- [15] 3GPP : *TS 25.967 v9.0.0 Universal mobile telecommunications system (umts); fdd home node b (hnb) rf requirements*; Techn. Ber. ; Février 2010.

- [16] 3GPP : *TS 36.300 V8.12.0 Technical Specification Group Radio Access Network* ; Techn. Ber. ; Mars 2010.
- [17] 3GPP : *TS 36.401 V8.8.0 Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) ; Architecture description (Release 8)* ; Techn. Ber. ; Juin 2010.
- [18] 3GPP : *TR 36.912 V10.0.0 Feasibility study for Further Advancements for E-UTRA (LTE-Advanced) (Release 10)* ; Techn. Ber. ; Mars 2011.
- [19] 3GPP : *TR 36.913 V10.0.0 Requirements for further advancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) (LTE-Advanced) (Release 10)* ; Techn. Ber. ; Mars 2011.
- [20] 3GPP : *TS 23.401 V10.3.0 Technical Specification Group Services and System Aspects* ; Techn. Ber. ; Mars 2011.
- [21] 3GPP : *TS 32.781 V10.0.0 Technical Specification Group Services and System Aspects* ; Techn. Ber. ; Mars 2011.
- [22] 3GPP : *TS 23.401 V8.16.0 General Packet Radio Service (GPRS) enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) access (Release 8)* ; Techn. Ber. ; Mars 2012.
- [23] 3GPP : *V0.2.6 Overview of 3GPP Release 8* ; Techn. Ber. ; Mars 2012.
- [24] 3GPP : *Third Generation Partnership Project Agreement* ; Techn. Ber. ; Août 2007.
- [25] 4G Americas : *Self-Optimizing Networks - The Benefits of SON in LTE* ; Techn. Ber. ; Juillet 2011.
- [26] M Amirijoo, P Frenger et al. : *Neighbor Cell Relation List and Physical Cell Identity Self-Organization in LTE* ; ICC Workshops 2008 IEEE International Conference on Communications Workshops ; S. 37–41 ; 2008.
- [27] M. Andersin und J. Rosberg, Z. et Zander : *Gradual removals in cellular PCS with constrained power control and noise* ; in *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 1995. PIMRC'95. 'Wireless : Merging onto the Information Superhighway'*, Sixth IEEE International Symposium on ; Bd. 1 ; S. 56 –60 vol.1 ; sept 1995.
- [28] K. Brueninghaus, D. Astely et al. : *Link performance models for system level simulations of broadband radio access systems* ; in *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2005. PIMRC 2005. IEEE 16th International Symposium on* ; Bd. 4 ; S. 2306 –2311 Vol. 4 ; sept. 2005.
- [29] V. Chandrasekhar, J. Andrews et al. : *Power control in two-tier femtocell networks* ; IEEE Trans. Wireless Commun. ; 8(8), S. 4316 –4328 ; Août 2009.
- [30] H. Claussen : *Efficient modelling of channel maps with correlated shadow fading in mobile radio systems* ; 1, S. 512 –516 ; sept. 2005.
- [31] E. Dahlman, S. Parkvall et al. : *3G Evolution : HSPA and LTE for Mobile Broadband* ; 2008.
- [32] E. Dahlman, S. Parkvall et al. : *3G Evolution, Second Edition : HSPA and LTE for Mobile Broadband* ; Academic Press ; 2. Aufl. ; 2008.

- [33] A. Damnjanovic, J. Montojo et al. : *A survey on 3GPP heterogeneous networks* ; *IEEE Trans. Wireless Commun.* ; 18(3), S. 10 –21 ; Juin 2011.
- [34] Ngdoc-Dung Dao, Josep Soler-Garrido et al. : *Design and Evaluation of Antenna Selection Methods for Interference Rejection Combining* ; *IEEE Trans. Wireless Commun.* ; 11(8), S. 2751 –2759 ; Août 2012.
- [35] M. Fiacc : *Using NTP for network synchronisation femtocells of of 3G femtocells* ; Octobre 2008.
- [36] Broadband Forum : *TR-069 CPE WAN Management Protocol v1.1* ; Techn. Ber. ; Décembre 2007.
- [37] Femto Forum : [http ://www.femtoforum.org/femto/aboutfemtocells.php](http://www.femtoforum.org/femto/aboutfemtocells.php) . ; 2012.
- [38] André Bourdoux Marco Della Maggiora Henryk Gierszal Ismael Gutiérrez Alain Mourad Stephan Pfletschinger Giacomo Bacci, Joan Bas : *Proposals for IMT-Advanced systems, issue 1 ; INFSCO-ICT-216203 DAVINCI D2.1.3 v1.0* ; Juin 2009.
- [39] G. X. Cai et Giannakis : *A two-dimensional channel simulation model for shadowing processes* ; *Vehicular Technology, IEEE Transactions on* ; 52(6), S. 1558 – 1567 ; nov. 2003.
- [40] R. Haratian und A.R. Sharafat : *Better QoS and less power in wireless ad hoc networks by distributed power control using power and SINR-based pricing functions* ; in *Wireless Communications Signal Processing, 2009. WCSP 2009. International Conference on* ; S. 1 –5 ; nov. 2009.
- [41] Xin He, Kai Niu et al. : *Link Layer Abstraction in MIMO-OFDM System* ; in *Cross Layer Design, 2007. IWCLD '07. International Workshop on* ; S. 41 –44 ; sept. 2007.
- [42] J.C. Ikuno und M. Wrulich, M. et Rupp : *System Level Simulation of LTE Networks* ; in *Vehicular Technology Conference (VTC 2010-Spring), 2010 IEEE 71st* ; S. 1 –5 ; Mai 2010.
- [43] ITU : *World mobile telecommunication market forecast* ; 2006.
- [44] ITU : *World Telecommunication /ICT Indicators Database* ; Juin 2012.
- [45] ITU-R : *IMT-Advanced Requirements* ; Mars 2007.
- [46] ITU-R : *Requirements, evaluation criteria and submission templates for the development of IMT-Advanced REPORT ITU-R M.2133* ; 2008.
- [47] ITU-R : *Requirements related to technical performance for IMT-Advanced radio interface(s) REPORT ITU-R M.2134* ; 2008.
- [48] Junsik Kim, Hongsoog Kim et al. : *SON and Femtocell Technology for LTE-Advanced System* ; in *Wireless and Mobile Communications (ICWMC), 2010 6th International Conference on* ; S. 286 –290 ; sept. 2010.
- [49] William C. Lee : *Mobile Communications Engineering* ; McGraw-Hill Professional ; 1982.
- [50] Huarui Liang, Songyeon Cho und XiaoQiang Li : *How to support local IP access from the femto cell* ; in *Communications Technology and Applications, 2009. ICCTA '09. IEEE International Conference on* ; S. 401 –405 ; oct. 2009.

- [51] Recommandation UIT-R M.1645 : *Cadre et objectifs d'ensemble du développement futur des IMT-2000 et des systèmes postérieurs aux IMT-2000* ; juin 2003.
- [52] W. Mohr, J.F. Monserrat et al. : *IMT-Advanced and next-generation mobile networks [Guest Editorial]* ; *Communications Magazine, IEEE* ; 49(2), S. 82 –83 ; february 2011.
- [53] Andreas F. Molisch : *Wireless Communications* ; second edition Aufl. ; 2011.
- [54] Duy Trong Ngo, Long Bao Le et al. : *Distributed Interference Management in Two-Tier CDMA Femtocell Networks* ; *Wireless Communications, IEEE Transactions on* ; 11(3), S. 979 –989 ; Mars 2012.
- [55] K. Nishimori, K. Kitao und T. Imai : *Interference Cancellation Using Relay Station in Heterogeneous Networks* ; in *Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2011 IEEE* ; S. 1 –5 ; sept. 2011.
- [56] Dong-Chan Oh, Heui-Chang Lee und Yong-Hwan Lee : *Power Control and Beamforming for Femtocells in the Presence of Channel Uncertainty* ; *IEEE Trans. Vehicular Technology* ; 60(6), S. 2545 –2554 ; Juillet 2011.
- [57] M. Ouellette, Kuiwen Ji et al. : *Using IEEE 1588 and boundary clocks for clock synchronization in telecom networks* ; *Communications Magazine, IEEE* ; 49(2), S. 164 –171 ; Février 2011.
- [58] S. Parkvall, A. Furuska andr und E. Dahlman : *Evolution of LTE toward IMT-advanced* ; *Communications Magazine, IEEE* ; 49(2), S. 84 –91 ; Février 2011.
- [59] R. Sandanalakshmi, T.G. Palanivelu und K. Manivannan : *Effective SNR mapping for link error prediction in OFDM based systems* ; in *Information and Communication Technology in Electrical Sciences (ICTES 2007), 2007. ICTES. IET-UK International Conference on* ; S. 684 –687 ; Décembre 2007.
- [60] N. Saquib, E. Hossain et al. : *Interference management in OFDMA femtocell networks : issues and approaches* ; *IEEE Trans. Wireless Commun.* ; 19(3), S. 86 –95 ; Juin 2012.
- [61] Klas Johansson Laetitia Falconetti Sara Landstrom, Anderson Furuskar und Frederic Kronstedt : *Heterogeneous networks : increasing cellular capacity* ; Techn. Ber. ; Ericsson ; 2011.
- [62] E. Seidel und E. Saad : *LTE Home Node Bs and its enhancements in Release 9* ; Techn. Ber. ; Mai 2010.
- [63] Stefania Sesia, Issam Toufik und Matthew Baker : *LTE, The UMTS Long Term Evolution : From Theory to Practice* ; Wiley Publishing ; 2009.
- [64] M. Simsek und A. Czylik : *Decentralized Q-learning of LTE-femtocells for interference reduction in heterogeneous networks using cooperation* ; in *Smart Antennas (WSA), 2012 International ITG Workshop on* ; S. 86 –91 ; Mars 2012.
- [65] IEEE Communications Society : <http://community.comsoc.org/blogs/neilshah/femtocells-relays-advanced-wireless-networks> ; 2012.
- [66] Changho Suh, M. Ho und D.N.C. Tse : *Downlink Interference Alignment* ; *IEEE Trans. Commun.* ; 59(9), S. 2616 –2626 ; Septembre 2011.

- [67] Agilent Technologies : *Introducing LTE-Advanced* ; Techn. Ber. ; Mars 2011.
- [68] E. Tuomaala und Haiming Wang : *Effective SINR approach of link to system mapping in OFDM/multi-carrier mobile network* ; Bd. 2005 ; S. 140–140. IEEE ; 2005.
- [69] Wikipedia : <http://en.wikipedia.org/wiki/Femtocell> ; 2012.
- [70] WINNER : *IST-2003-507581 D2.7 ver 1.1 Assessment of Advanced Beamforming and MIMO Technologies* ; Techn. Ber. ; 2005.
- [71] LTE World : <http://lteworld.org/whitepaper/local-ip-access-home-node-b>.
- [72] M. Wrulich, S. Eder et al. : *Efficient Link-to-System Level Model for MIMO HSDPA* ; in *Proceedings of the 4th IEEE Broadband Wireless Access Workshop* ; New Orleans ; Décembre 2008.
- [73] M. Wrulich, W. Weiler und M. Rupp : *HSDPA Performance in a Mixed Traffic Network* ; in *Vehicular Technology Conference, 2008. VTC Spring 2008. IEEE* ; S. 2056–2060 ; Mai 2008.
- [74] Mingbo Xiao, N.B. Shroff und E.K.P. Chong : *A utility-based power-control scheme in wireless cellular systems* ; *Networking, IEEE/ACM Transactions on* ; 11(2), S. 210 – 221 ; Avril 2003.
- [75] Lin Yang und Pingping Wen : *Location Based Autonomous Power Control for ICIC in LTE-A Heterogeneous Networks* ; in *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011), 2011 IEEE* ; S. 1 –6 ; dec. 2011.
- [76] Jie Zhang und Guillaume de la Roche : *Femtocells : Technologies and Deployment* ; Wiley Publishing ; 2010.