



HAL
open science

Gestion des ressources et de la consommation énergétique dans les réseaux mobiles hétérogènes

Amira Choutri

► **To cite this version:**

Amira Choutri. Gestion des ressources et de la consommation énergétique dans les réseaux mobiles hétérogènes. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. Université Paris Saclay (COMUE), 2016. Français. NNT : 2016SACLV043 . tel-01472963

HAL Id: tel-01472963

<https://theses.hal.science/tel-01472963v1>

Submitted on 21 Feb 2017

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

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

NNT : 2016SACLV043

THÈSE DE DOCTORAT
DE
L'UNIVERSITE PARIS-SACLAY
PRÉPARÉE A
L'UNIVERSITÉ DE VERSAILLES SAINT-QUENTIN EN YVELINES

École Doctorale N°580
Sciences et Technologies de l'information et de la communication (STIC)

Spécialité de doctorat : Informatique

par

Amira CHOUTRI

Gestion des Ressources et de la Consommation Énergétique dans les Réseaux Mobiles Hétérogènes

Thèse présentée et soutenue publiquement à Versailles, le 01 Juillet 2016

Composition du Jury :

M. MAAG Stephane	Professeur à Telecom SudParis	Président
M. BEYLOT André-Luc	Professeur à l'ENSEEIH	Rapporteur
M. LAGRANGE Xavier	Professeur à Telecom Bretagne	Rapporteur
M. MARCÉ Olivier	Ingénieur de recherche à Nokia Bell-Labs	Examineur
M. BARTH Dominique	Professeur à l'UVSQ	Directeur de thèse
M ^{me} KLOUL Leila	MCF-HDR à l'UVSQ	Co-directeur de thèse

Remerciements

Je tiens à remercier Monsieur André-Luc BEYLOT, professeur à INP-ENSEEIH de Toulouse, et Monsieur Xavier LAGRANGE, professeur à Telecom Bretagne, qui m'ont fait l'honneur d'être les rapporteurs de ces travaux de thèse.

Je tiens également à remercier Monsieur Stephane MAAG et Monsieur Olivier MARCÉ pour leur participation au jury.

J'aimerais remercier très sincèrement mes directeurs de thèse Madame Leila KLOUL et Monsieur Dominique BARTH pour leur encadrement, leur patience ainsi que leur conseils tout au long de ma thèse.

Je remercie les membres du laboratoire PRISM (DAVID et Li-Parad) pour leur bonne humeur et leur ambiance.

Pour finir, je remercie mes parents à qui je dédie cette thèse. Je remercie ma famille, mes amis et tous ceux que j'aime et qui m'aiment ...

Titre : Gestion des ressources et de la consommation énergétique dans les réseaux mobiles hétérogènes

Mots clés : Réseaux Mobile ; Prédiction de la mobilité ; Femtocellules ; Energie ; Handover

Résumé : L'objectif de cette thèse est de développer les méthodes nécessaires à une gestion ciblée et efficace de la mobilité des utilisateurs dans un réseau mobile hétérogène. Ces réseaux sont caractérisés par le déploiement de différents types de cellules (macro, micro, pico et/ou femto). Le déploiement massif des petites cellules (pico et femto) a permis d'offrir une capacité et une qualité de couverture accrue au réseau, notamment dans les zones à forte densité. Cependant, les contraintes temps réel engendrées limitent la QoS offerte aux utilisateurs. De plus, pour des raisons commerciales et/ou environnementales, la nécessité de réduire la consommation énergétique des réseaux mobiles est devenue une réalité. Ainsi, les opérateurs mobiles doivent trouver le bon compromis entre d'une part, la garantie de la QoS offerte aux utilisateurs et la vitesse de mobilité de ces derniers, et d'une autre part, le coût énergétique engendré pour le déploiement du réseau. Pour cela, dans le cadre de la gestion de la mobilité des utilisateurs, nous

proposons des modèles pour la gestion des ressources des stations de base ainsi que pour la gestion de leur consommation énergétique. Le premier modèle proposé vise à gérer le partage des ressources entre les clients de l'opérateur mobile. Basé sur la prédiction de la mobilité des utilisateurs, ce modèle permet d'anticiper la gestion des ressources d'une station de base. Le deuxième modèle gère la consommation énergétique du réseau en se basant sur un contrôle d'affectation des utilisateurs mobiles. Cela permet de contrôler en continu la consommation énergétique des stations de base et la QoS qu'elles offrent aux utilisateurs mobiles. Par simulation, en utilisant une topologie réelle d'un réseau mobile, les performances des méthodes proposées sont évaluées en considérant différents scénarios possibles. Leurs performances sont comparées à celles de l'approche adoptée par des opérateurs mobiles actuels, ainsi qu'à celles de certaines approches proposées dans la littérature.

Title : Resources and energy consumption management in heterogeneous mobile networks

Keywords: Mobile networks; Mobility prediction; Femtocells; Energy; Handover

Abstract: The objective of this thesis is to develop methods for a targeted and efficient management of users mobility in heterogeneous mobile networks. This network is characterized by the deployment of different types of cells (macro, micro, pico and/or femto). The massive deployment of small cells (pico and femto) provides a supplementary coverage and capacity to mobile networks, specially in dense areas. However, the resulting real-time constraints limit the offered QoS. Furthermore, for commercial and/or environmental reasons, the needs to reduce the energy consumed by mobile networks became reality. Thus, mobile operators have to find a good compromise between, on the one hand, the users velocity and the guaranteed QoS, and on the other hand, the cost of deployment of such networks. For that, in the context of users mobility management, we

propose models for resource and energy consumption management of base stations. The first model aims at controlling resource sharing between clients of the mobile operators. Based on a mobility prediction of users, this model anticipates the resource management of a base station. The second model aims at reducing energy consumption of the network by managing mobile users assignment to detected cells. This allows a continuous control of consumed energy of base stations while offered QoS is guaranteed. Based on simulation of a real mobile network topology, the performances of proposed models are evaluated while considering different possible scenarios. They are compared to the performances of different strategies as the ones proposed in literature or adopted by current mobile operators.

Table des matières

Remerciement	iii
Table des figures	xi
Liste des tableaux	xiii
Liste des algorithmes	xv
Liste des sigles et acronymes	xvii
Liste des variables	xix
1 Introduction Générale	1
2 Présentation des réseaux mobiles	7
2.1 Introduction	7
2.2 Les réseaux mobiles	7
2.3 Les réseaux LTE hétérogènes	12
2.4 Gestion des ressources dans les réseaux mobiles	17
2.4.1 Partage de ressources entre opérateurs mobiles	18
2.4.2 Partage d'accès aux femtocellules	19
2.5 La consommation d'énergie dans les réseaux mobiles	21
2.5.1 Configuration dynamique des stations de base	23
2.5.2 Désactivation des stations de base	23
2.6 Conclusion	24
3 La mobilité dans les réseaux LTE Hétérogènes	25
3.1 Introduction	25
3.2 Gestion de la mobilité	26
3.3 Techniques de sélection de la cellule de rattachement	28
3.4 Prédiction de la mobilité	32
3.4.1 Analyse de l'historique	32
3.4.2 Méthodes de prédiction de la mobilité	34
3.5 Conclusion	37

4	Gestion prédictive des ressources	39
4.1	Introduction	39
4.2	Modèle de gestion des ressources par apprentissage	39
4.2.1	Acteurs du modèle	40
4.2.2	Modèle de jeu	41
4.2.3	Mobilité des utilisateurs	50
4.3	Gestion prédictive du partage des ressources	52
4.3.1	Modèle Markovien pour la prédiction de la mobilité	52
4.3.2	Partage anticipé des ressources	54
4.4	Analyse des performances	61
4.4.1	Scénarios considérés	61
4.4.2	Résultats numériques	62
4.5	Conclusion	66
5	Modèle et algorithmes pour l'affectation des utilisateurs	69
5.1	Introduction	69
5.2	Modèle de gestion d'affectation des utilisateurs	69
5.2.1	Acteurs	70
5.2.2	Propriétés énergétiques	72
5.2.3	Allocation des ressources	73
5.3	Algorithmes de sélection de la cellule de connexion	74
5.3.1	Algorithme d'affectation aux femtocellules	77
5.3.2	Algorithme d'affectation aux macrocellules	81
5.4	Transfert de trafic pour l'équilibrage de charge	82
5.4.1	Transfert en Femto-To-Macro	83
5.4.2	Transfert en Macro-To-Femto	83
5.5	Contrôle de la consommation d'énergie des stations de base	84
5.5.1	Stratégie basée sur un transfert FTM	85
5.5.2	Contrôle SMTF	87
5.6	Analyse des performances	88
5.6.1	Construction du réseau de couverture	89
5.6.2	Résultats numériques	91
5.7	Conclusion	96
6	Gestion d'affectation avec prise en compte de la mobilité	99
6.1	Introduction	99
6.2	Modèle de gestion d'affectation des mobiles	100
6.3	Contrôle local d'affectation des mobiles	102
6.3.1	Sélection de la cellule de connexion	102
6.3.2	Stratégies de contrôle local d'affectation	104
6.4	Analyse des performances	107
6.4.1	Scénarios de comparaison	107
6.4.2	Résultats numériques	110
6.5	Conclusion	115

TABLE DES MATIÈRES

7 Conclusion et Perspectives	117
Annexes	121
A Sélection de la cellule de connexion	123
B Taille du sous-ensemble des femtocellules potentielles	127
C Le dilemme du prisonnier	129
Bibliographie	131

Table des figures

2.1	Les différentes technologies des réseaux mobiles	8
2.2	Équipements du réseau LTE	13
2.3	Architecture du E-UTRAN	14
2.4	Types de cellules selon la zone de couverture.	15
2.5	Ressources physiques d'une station de base	17
2.6	Messages échangés pour le partage d'accès aux femtocellules	20
2.7	La consommation d'énergie des équipements du réseau	21
2.8	Évolution de la consommation énergétique d'une station de base	22
3.1	Handover inter-eNodeB.	27
3.2	Exemple de mesures de signal et décision de handover	30
3.3	Exemple de trace de mobilité	33
3.4	Prédiction de la mobilité selon le secteur visité	36
4.1	Principe général de l'apprentissage par renforcement	48
4.2	La mobilité des utilisateurs et la gestion des ressources	51
4.3	Gestion prédictive de partage des ressources	58
4.4	Gestion prédictive de partage des ressources : attribution des ressources par la cellule de connexion.	60
4.5	Utilité obtenu par les utilisateurs mobiles observés	64
4.6	La QoS obtenue pour les utilisateurs mobiles observés	67
5.1	Architecture d'un réseau LTE hétérogène	70
5.2	Niveaux de distance entre un utilisateur et une station de base	74
5.3	Exemple d'affectation des utilisateurs aux femtocellules	80
5.4	Exemple d'affectation des utilisateurs aux femtocellules - suite	81
5.5	Stratégies de contrôle de la consommation énergétique	85
5.6	L'évolution de la charge du réseau par rapport à la charge <i>fondamentale</i> et la charge <i>augmentée</i>	92
5.7	Consommation d'énergie totale des stations de base du réseau	93
5.8	Pourcentage des femtocellules activées	94
5.9	Nombre d'utilisateurs servis.	95
5.10	Pourcentage de la capacité totale allouée par rapport à <i>SB</i>	95
5.11	Intensité énergétique du réseau	96

TABLE DES FIGURES

6.1	Stratégies de contrôle local d'affectation des utilisateurs	104
6.2	Consommation énergétique du réseau	111
6.3	Pourcentage des femtocellules activées	113
6.4	Nombre mobiles servis en fonction de la charge du réseau	113
6.5	Capacité totale allouée pour les mobiles servis	114
6.6	Énergie consommée par mobile servi (W)	114
A.1	Consommation énergétique globale du réseau.	123
A.2	Pourcentage des femtocellules actives	125
A.3	Pourcentage des utilisateurs servis	125
A.4	Intensité énergétique du réseau	125
B.1	Consommation énergétique globale du réseau.	127
B.2	Pourcentage des femtocellules actives	128
B.3	Pourcentage des utilisateurs servis	128
B.4	Intensité énergétique du réseau	128

Liste des tableaux

2.1	Consommation énergétique de certain types de stations de base	23
4.1	Différents profils d'un client demandeur ou fournisseur de service	42
4.2	Stratégies possibles d'un CDS sensible au prix	45
4.3	Stratégies possibles d'un CDS sensible à la QoS	46
4.4	Taux de prédiction juste pour différents utilisateurs mobiles	63
4.5	Stratégies de demande de ressources et les réponses prévues de la cellule prédite	66
4.6	Stratégies jouées et quantités de ressources réellement allouées par f_i	66
5.1	Scénarios des stratégies considérées	90
6.1	Scénarios des stratégies considérées	110
A.1	Scénarios des stratégies considérées	124
C.1	Matrice des stratégies possibles et gains correspondants	129
C.2	Meilleures stratégies des joueurs	130
(a)	Meilleures stratégies du joueur 1	130
(b)	Meilleures stratégies du joueur 2	130

Liste des algorithmes

1	Gestion prédictive de Handover	57
2	Affectation des utilisateurs aux femtocellules	79
3	Affectation des utilisateurs aux macrocellules	82
4	LFTM	106
5	LMTF	108

Liste des sigles et acronymes

Acronyme	signification	page
3GPP	3rd Generation Partnership Project	10
CDS	Client Demandeur de Service	41
CFS	Client Fournisseur de Service	40
EDGE	Enhanced Data Rates over GSM Evolution	9
eNB	Evolved Node B	12
EPC	Evolved Packet Core	12
E-UTRAN	Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network	12
FDMA	Frequency Division Multiple Access	8
<i>G</i>	Type de bande passante garanti	43
<i>GFTM</i>	Contrôle global basé sur un transfert Femto-To-Macro	107
<i>GMTF</i>	Contrôle global basé sur un transfert Macro-To-Femto	107
GPRS	General Packet Radio Service	9
GSM	Global System for Mobile communication	9
HeNB	Home Evolved Node B	12
HSPA	High-Speed Packet Access	10
HSS	Home Subscriber Server	12
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	11
IMT	International Mobile Telecommunication	10
<i>Int</i>	Intensité énergétique du réseau	92
ITU	International Telecommunication Union	10
<i>LFTM</i>	Contrôle local basé sur un transfert Femto-To-Macro	105
<i>LMTF</i>	Contrôle local basé sur un transfert Macro-To-Femto	105
LTE	Long Term Evolution	11
MME	Mobility Management Entity	12
<i>NG</i>	Type de bande passante non-garanti	43
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access	11
<i>PF</i>	Prédiction fausse	61
PGW	Packet Data Network Gateway	12
<i>PJ₁</i>	Prédiction juste de tous les mobiles (mobile observé et mobiles concurrents)	61

<i>PJ₂</i>	Prédiction juste du mobile observé et quelque mobiles concurrents	61
QoS	Qualité de service	1
<i>RFTM</i>	Stratégie Random basée sur un transfert Femto-To-Macro	88
<i>RMTF</i>	Stratégie Random basée sur un transfert Macro-To-Femto	88
RRC	Radio Ressource Control	28
RSRP	Reference Signal Received Power	28
RSRQ	Reference Signal Receaived Quality	28
RSSI	Receaved Signal Strenght Indicator	28
<i>SB</i>	Stratégie Basique	107
<i>SB₁</i>	Stratégie Basique 1	88
<i>SB₂</i>	Stratégie Basique 2	88
SC	Single carrier	12
<i>SFTM</i>	Stratégie basée sur un transfert Femto-To-Macro	85
S-GW	Serving Getway	12
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio	28
<i>SMTF</i>	Stratégie basée sur un transfert Macro-To-Femto	87
<i>SP</i>	Sans prédiction	61
TBAS	Token Based Accounting System	20
TCP/IP	Transmission Control Protocol / Internet Protocol	9
TDMA	Time Division Multiple Access	9
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System	10
W-CDMA	Wideband Code Division Multiple Access	10
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access	11

Liste des variables

Variable	définition	page
α	Sensibilité à la QoS	41
Δ	La taille des intervalles de bande passante qu'un CDS voudrait idéalement recevoir	45
$\Gamma(C_i)$	Ensemble des cellules voisines de C_i	52
μ	Sensibilité au gain	40
Π	Profil stratégique lorsque le joueur i choisi la stratégie $s_{i k_i}$, tel que : $\Pi = \{s_{1 k_1}, s_{2 k_2}, \dots, s_{N k_N}\}$	41
ρ	Risque de préemption	43
b	Paramètre de mise à jour du vecteur des probabilités associées Vt_i	47
$B(p)$	Bande passante disponible (offerte au partage) du CFS p	43
$B^r(p)$	Bande passante restante du CFS p	49
$B_G(p)$	Bande passante disponible de type garanti du CFS p	43
$B_{NG}(p)$	Bande passante disponible de type non-garanti du CFS p	43
bw_i	La quantité de bande passante allouée au CDS i	47
C_n	La cellule courante	52
$Cap(f)$	Capacité disponible en terme de ressources de la femtocellule f	54
$Cap(m)$	Capacité disponible de la macrocellule m (en termes de blocs de ressources)	71
$Cap(m, t)$	Capacité disponible de la macrocellule m à l'étape t (en termes de blocs de ressources)	101
$Cap_{all}(u)$	Capacité allouée par la cellule de rattachement pour l'utilisateur u	70
$Cap_{all}(u, t)$	Capacité allouée au mobile u à l'étape t	54
$Cap_{NG}(f_i)$	Capacité disponible en terme de ressources non-garanties de la femtocellule f_i	54
$Cap_{req}(u)$	Capacité requise par le mobile u (en termes de blocs de ressources)	70
$Cap_{req}(u, t)$	Capacité requise par le mobile u à l'étape t (en termes de blocs de ressources)	54
$Cap_G(f_i)$	Capacité disponible en terme de ressources garanties de la femto-cellule f_i	54
$Cell(u)$	Cellule de rattachement de l'utilisateur u	70
$Cell(u, t)$	Cellule de rattachement du mobile u à l'étape t	100

$CowFem(m)$	Ensemble des femtocellules couvertes par la macrocellule m	72
$CowMob(f)$	Ensemble des utilisateurs localisés dans la zone de couverture de la femtocellule f	70
$CowMob(f, t)$	Ensemble des utilisateurs localisés dans la zone de couverture de la femtocellule f à l'étape t	101
E	Ensemble des sommets	54
E_{Femto}^0	Consommation énergétique de la station de base d'une femtoecllule vide	72
E_{Macro}^0	Consommation énergétique de la station de base d'une macrocel- lule vide	72
$E_{Femto}(f)$	Consommation énergétique de la station de base de la femtocellule f	72
$E_{Femto}(f, t)$	Consommation énergétique de la station de base de la femtocellule f à l'étape t	101
$E_{Macro}(m)$	Consommation énergétique de la station de base de la macrocellule m	72
$E_{Macro}(m, t)$	Consommation énergétique de la station de base de la macrocellule m à l'étape t	101
E_{Net}	Consommation énergétique globale du réseau	76
$E_{Net}(t)$	Consommation énergétique globale du réseau à l'étape t	103
E_{Net}^0	Consommation énergétique globale du réseau avant l'équilibrage de charge	83
$E_{Net}^0(t)$	Consommation énergétique globale du réseau à l'étape t et avant l'équilibrage de charge	107
\hat{E}_{Net}	Estimation de la consommation énergétique globale du réseau	86
$\hat{E}_{Net}(t)$	Estimation de la consommation énergétique globale du réseau à l'étape t	107
$Fconnect(f)$	Nombre d'utilisateurs qu'une femtocellule f peut servir simultanément	71
$Fconnect(f, t)$	Nombre d'utilisateurs qu'une femtocellule f peut servir simultanément à l'étape t	101
$Fconnect_0$	Nombre initial d'utilisateurs qu'une femtocellule peut servir simultanément	71
$Femto(u)$	Ensemble des femtocellules détectées par l'utilisateur u	70
$Femto(u, t)$	Ensemble des femtocellules détectées par l'utilisateur u à l'étape t	100
\mathcal{G}_f^{FTM}	Gain global en consommation d'énergie après un équilibrage de charge en FTM	86
\mathcal{G}_f^{MTF}	Gain global en consommation d'énergie après un équilibrage de charge en MTF	87
$\mathcal{G}_f^{MTF}(t)$	Gain global en consommation d'énergie après un équilibrage de charge en MTF à l'étape t	107
$H(C_n)$	La fréquence des visites des cellules voisines de C_n	54
J	Ensemble des joueurs ; $J = \{j_1, j_2 \dots j_N\}$	41
L	Trace de mobilité ; $L = C_1 C_2 C_3 \dots C_{n-1} C_n$	52

Liste des variables

$Load(c)$	Charge de la cellule c	71
$Load(c, t)$	Charge de la cellule c à l'étape t	71
$M(C_k, C_i, C_j)$	Le nombre de transitions du mobile, dans le passé, de la cellule C_i vers la cellule voisine C_j sachant qu'il était dans C_k avant d'aller à C_i	53
M_i^X	La quantité maximale de bande passante de type x demandée par le CDS i	43
m_i^X	La quantité minimale de bande passante de type x demandée par le CDS i	43
$MinQ(u, m)$	Facteur de la qualité du signal entre l'utilisateur u et la station de base de la macrocellule m	72
$Mob(c)$	Ensemble des utilisateurs connectés physiquement à la station de base de la cellule c	71
$Mob(c, t)$	Ensemble des utilisateurs connectés physiquement à la station de base de la cellule c à l'étape t	101
$N(C_k, C_i)$	Le nombre de transitions du mobile, dans le passé, de la cellule C_k vers la cellule C_i	53
nb_{Opt}	Nombre de tours d'apprentissage réalisés avant la convergence vers la meilleure stratégie	47
nb_{App}	Le nombre de tours d'apprentissage que le mobile observé a réalisé	50
$nb_{max}(f)$	Nombre maximum de mobiles qu'une femtocellule f peut gérer simultanément	54
$P(X_{n+1}=Y/X_n=X)$	Probabilité de transition de la cellule courante C_n vers la cellule voisine C_{n+1}	52
$Pred(u, t)$	Cellule de connexion prédite par le mobile u à l'étape t	54
$q(s_{i_k})$	Probabilité que le joueur i joue la stratégie s_{i_k}	41
$Q(f, m)$	Facteur de qualité du signal entre la femtocellule f et la macrocellule m	73
$r(C_i)$	Le temps de résidence moyen du mobile dans la cellule C_i	53
R_i	Réponse envoyé au CDS i	47
$s_u^*(t)$	Stratégie anticipée et à jouer à l'étape t par le mobile u	54
$s_u(t)$	La stratégie adopté par le mobile u à l'étape t	54
S_i	Ensemble des stratégies possibles que le joueur i peut jouer ; $S_i = \{s_{i_1}, s_{i_2} \dots s_{i_{m_i}}\}$ tel que $m_i = S_i $	41
$Seuil_{Prix_i}^k$	Le seuil en capacité maximale de bande passante que le CDS i est prêt à payer lorsqu'il adopte la stratégie s_{i_k}	45
$Seuil_{QoS_i}^k$	Le seuil de QoS du CDS i pour la stratégie s_{i_k}	46
$St(f)$	État de la station de base de la femtocellule f	71
$St(f, t)$	État de la station de base de la femtocellule f à l'étape t	101
$Ulog(f)$	Sous-ensemble des utilisateurs connectés logiquement à la station de base de f	71
$Ulog(f, t)$	Sous-ensemble des utilisateurs connectés logiquement à la station de base de f à l'étape t	101
$Util_u(t)$	Utilité obtenue du mobile u à l'étape t	54
$Util_i(\Pi)$	Utilité du joueur i pour le profil stratégique Π	41

Liste des variables

V	Ensemble des arêtes	54
$V(f)$	graphe de voisinage de la femtocellule f	54
Vt_i	Vecteur de probabilités associé à l'ensemble des stratégies S_i du joueur i ; $Vt_i = (q(s_{i_1}), \dots, q(s_{i_{m_i}}))$	41
$Z(C_n)$	Le nombre de fois que la cellule C_n a été visitée	53

Chapitre 1

Introduction Générale

Les télécommunications ont connu une importante évolution depuis leur apparition. Les réseaux des premières générations proposaient aux clients de communiquer simplement par la voix via un réseau analogique. Grâce aux réseaux numériques, la transmission des données (messages texte, ...) est devenue possible. Actuellement, avec la dernière génération des technologies mobiles, la communication entre clients peut se faire par vidéo haute définition même lorsqu'ils sont mobiles [1].

Les opérateurs ne cessent de surprendre leurs clients en proposant de nouveaux services de plus en plus évolués. La technologie du futur vise à inter-connecter le monde et créer des villes durables, intelligentes et entièrement connectées. Le rôle des opérateurs est de proposer un réseau mobile qui permettrait une telle connexion. Afin de satisfaire tous les clients, le réseau doit disposer d'une capacité suffisante afin de gérer le trafic et garantir une qualité de service (QoS) adaptée. En effet, la QoS offerte définit les performances globales d'un réseau, notamment d'un point de vue utilisateur. Elle est définie comme la satisfaction du client par les services du réseau, ce qui inclut, en particulier, la qualité de la communication (audio et/ou vidéo), la puissance du signal de transmission et le taux d'acceptation des appels [2]. Autrement dit, la QoS dépend de différentes mesures telles que le débit, les délais, le taux d'erreurs et la disponibilité. La garantie de la QoS offerte constitue un défi pour les opérateurs mobiles, étant donnée la capacité limitée des réseaux et le nombre de ses utilisateurs [2]. De plus, avec la diversité des services offerts, un réseau de télécommunication doit garantir la continuité de la connexion lorsque les utilisateurs sont mobiles, quel que soit leur moyen de déplacement, autrement dit, la vitesse avec laquelle ils se déplacent. Une gestion efficace de l'allocation des ressources aux utilisateurs est donc nécessaire dans les réseaux mobiles.

Afin d'améliorer les performances du réseau et d'offrir une capacité supplémentaire aux clients, d'autres types de cellules, en plus des macrocellules, sont déployés. Selon la zone de couverture, des cellules de taille *micro*, *pico* ou *femto* sont déployées afin d'aider les macrocellules à gérer le trafic et garantir la QoS offerte aux utilisateurs. Le déploiement de ces petites cellules dans des zones urbaines telles qu'une usine, une station de métro ou de service, ou même chez le client, permet d'étendre la couverture intérieure et extérieure du réseau. Lorsque les macrocellules sont fortement chargées, les petites cellules peuvent servir à un équilibrage de la charge entre les cellules et améliorer ainsi les performances du réseau. Ainsi, lorsque plus de deux types de cellules (macro et

soit micro, pico ou femto) sont déployés, le réseau est dit *hétérogène*¹ [3]. Cependant, étant donné la taille des cellules et le temps de résidence des utilisateurs dans chacune d'entre elles, les contraintes temps réel dans ce type de réseau (hétérogène) sont encore plus fortes. Pour cela, la mobilité des utilisateurs doit être gérée efficacement afin de garantir la QoS et la continuité des services offerts.

Par ailleurs, afin de satisfaire les clients, la majorité des équipements d'un réseau mobile consomment de l'énergie, étant toujours activée. Cependant, l'énergie est actuellement au centre de différents débats géopolitiques, économiques, environnementaux, scientifiques et techniques [4]. En effet, la crainte d'un épuisement des ressources matérielles, le réchauffement climatique, les problèmes politiques et de sécurité d'approvisionnement, ainsi que la combinaison de ces phénomènes font que le coût énergétique de ces réseaux augmente d'une façon exponentielle. De ce fait, les opérateurs doivent répondre aux besoins énergétiques de ces équipements et proposer des solutions permettant le bon compromis entre, d'une part, la QoS offerte à leur clients, et d'autre part, le coût énergétique engendré.

Dans le cadre de cette thèse, nous nous intéressons au problème de gestion des ressources et au contrôle de la consommation énergétique des stations de base en considérant un réseau mobile hétérogène constitué de cellules macro et femto. Le terminal d'un utilisateur est rattaché à la station de base d'une cellule et à laquelle il demande une quantité de ressources afin de se connecter au réseau. La cellule (femto ou macro) décide de satisfaire la demande de ressources selon sa capacité disponible et la qualité du signal de transmission. L'utilisateur mobile est donc connecté à sa station de base. Par ailleurs, pour chaque ressource allouée, la station de base de la cellule consomme une quantité d'énergie pour la gestion de ses équipements et les échanges de signaux avec le terminal mobile de l'utilisateur.

L'objectif des travaux de cette thèse consiste principalement à mettre en œuvre deux solutions complémentaires permettant aux stations de base du réseau une allocation équitable et réfléchie de leurs ressources afin de servir le plus de clients possibles avec des garanties de QoS à moindre coût, notamment lorsqu'ils se déplacent.

La première solution consiste en une gestion anticipée des ressources des stations de base. Étant donné la capacité limitée en ressources des stations de base, chacune d'entre elles décide de la quantité de ressources à allouer pour chaque utilisateur selon sa demande. Pour cela, la gestion anticipée des ressources est basée sur un modèle de partage de ressources entre, d'une part, les stations de base, et d'autre part, les utilisateurs mobiles [5]. Le partage des ressources est basé sur la théorie des jeux et propose aux utilisateurs d'apprendre à formuler leurs demandes de ressources selon la capacité disponible de la station de base, ainsi que les demandes des autres utilisateurs concurrents. Cependant, bien que les déplacements soient propres à chaque utilisateur, les auteurs dans [5] supposent que les mobiles se connectent à une cellule en même temps. De plus, dans un contexte de réseau hétérogène (déploiement de femtocellules), la vitesse de déplacement des utilisateurs ne permet pas aux cellules de préparer l'allocation des ressources aux mobiles et satisfaire la QoS qu'ils exigent. Nous proposons

1. Un réseau dans lequel seules les macrocellules sont déployées est dit *homogène* [3].

alors d'utiliser un modèle de prédiction de la mobilité des utilisateurs. Cela permet une gestion prédictive des ressources des stations de base. Celle-ci dépend du résultat de la prédiction du prochain point de connexion de chaque mobile. Ainsi, plusieurs scénarios possibles sont analysés afin de proposer une gestion efficace des ressources, aussi bien pour les stations de base que pour les mobiles.

La deuxième solution proposée dans le cadre de cette thèse consiste en un contrôle de la consommation énergétique des stations de base du réseau. Cette solution montre l'impact de la stratégie d'affectation des mobiles aux cellules (femto et macro) détectées sur, d'une part, la QoS qui leur est offerte par la cellule sélectionnée, et d'autre part, la consommation énergétique de sa station de base. En effet, une gestion efficace des ressources ne peut être réalisée qu'après une sélection réfléchie de la cellule à laquelle un mobile devra être connecté. De plus, la consommation énergétique d'une station de base dépend directement de sa charge. Ainsi, le contrôle de sélection de la cellule de connexion permet au réseau de gérer le trafic qui circule dans sa zone de couverture et d'équilibrer la charge entre les différentes stations de base. Autrement dit, le contrôle de sélection de la cellule de connexion permet de gérer l'allocation des ressources et de réduire la consommation énergétique des stations de base du réseau.

Contrairement aux macrocellules, la station de base d'une femtocellule peut être désactivée lorsqu'aucun utilisateur n'y est connecté. De plus, même lorsque sa capacité disponible ne permet pas de satisfaire plus de mobiles (cellule chargée), cette station de base consomme moins d'énergie qu'une station de base de macrocellule. Partant de ce fait, nous proposons deux stratégies différentes pour la sélection de la cellule de connexion. Pour chaque stratégie proposée, une priorité d'affectation est attribuée à un type de cellule (femto ou macro). Ces stratégies consistent chacune en deux phases. Dans la première phase, une affectation initiale des utilisateurs aux cellules sélectionnées selon un critère prédéfini est réalisée. Dans la deuxième phase, un équilibrage de la charge entre les femtocellules et les macrocellules est réalisée. L'affectation initiale est remise en cause en transférant les connexions des utilisateurs depuis/vers les macrocellules si cela permet une réduction de la consommation énergétique globale du réseau.

En se basant sur des algorithmes gloutons, nous proposons d'abord un contrôle global de sélection de la cellule de connexion. Ce contrôle affecte tous les utilisateurs présents dans le réseau étant donnés des emplacements fixes. Ainsi, toutes les stations de base du réseau sont gérées en même temps.

Ensuite, en considérant la mobilité des utilisateurs, un contrôle local est proposé. Il gère la sélection de la cellule de connexion pour chaque utilisateur lorsqu'il se déplace, ce qui permet de gérer l'allocation des ressources ainsi que la consommation énergétique des cellules détectées par cet utilisateur. L'efficacité du réseau est améliorée en termes de coût énergétique, du nombre de mobiles servis, de la capacité allouée et du nombre de femtocellules désactivées. Les algorithmes de contrôle global et local proposés sont faciles à implémenter et adaptés aux contraintes temps réel des réseaux mobiles hétérogènes.

La structure que nous allons suivre pour présenter les différents travaux de cette thèse est comme suit :

Les chapitres 2 et 3 donnent un aperçu général sur les réseaux mobiles. Dans le chapitre 2, nous montrons, dans un premier temps, l'évolution de cette technologie afin de présenter l'architecture du réseau adoptée actuellement par les opérateurs mobiles. Cette architecture est celle considérée dans les travaux présentés dans les chapitres suivants. Nous présentons également les principaux problèmes auxquels les opérateurs mobiles font face actuellement, c'est-à-dire la capacité offerte et le coût énergétique du réseau déployé. Un état de l'art des travaux existants qui traitent ces problèmes est discuté à la fin de ce chapitre.

Le chapitre 3 est dédié à la mobilité des utilisateurs dans le réseau. Le processus exécuté par le réseau, en particulier les stations de base, pour la gestion de la mobilité des utilisateurs est présenté et discuté. Quelques modèles de gestion de la mobilité proposés dans la littérature, tels que les modèles de prédiction de la mobilité des utilisateurs, sont également discutés à la fin de ce chapitre.

Dans le chapitre 4, nous proposons une gestion prédictive des ressources basée sur un modèle économique de partage de ces ressources. Afin de présenter le principe de fonctionnement de ce modèle, nous introduisons les notions de la théorie des jeux sur lesquelles il est basé. Le modèle de prédiction de la mobilité des utilisateurs est également présenté afin d'adapter le modèle économique à la mobilité des utilisateurs dans un réseau hétérogène. Le mécanisme de la gestion prédictive des ressources est ensuite proposé en considérant différents scénarios possibles. Grâce à des données réelles de topologie de réseau ainsi que l'historique des déplacements de différents utilisateurs, les résultats des simulations réalisées sont analysés à la fin de ce chapitre.

Les chapitres 5 et 6 sont consacrés, respectivement, à la gestion *globale* et *locale* de la consommation énergétique des réseaux mobiles. Nous présentons d'abord dans le chapitre 5, les algorithmes d'affectation des utilisateurs sur lesquels sont basées les stratégies de contrôle global proposées. Le mécanisme de fonctionnement de chaque stratégie, étant données des emplacements fixes des utilisateurs, est présenté. En utilisant des données de topologie réelle de réseau mobile hétérogène, les performances de ces stratégies sont analysées par simulations. Nous les comparons à une stratégie basée sur la désactivation des stations de base des femtocellules durant les périodes de faible trafic (proposée dans [6] et [7]). Considérer la stratégie actuelle des opérateurs mobiles, c'est-à-dire aucun contrôle de la consommation énergétique, a permis également d'analyser et de comparer les performances obtenues par les différentes stratégies. Les algorithmes d'affectation des utilisateurs proposés dans ce chapitre sont aussi comparés à un algorithme d'affectation basé sur la puissance et la qualité du signal de transmission des cellules détectées pour chaque stratégie proposée. Cela montre l'impact d'un contrôle de sélection de la cellule de connexion sur l'efficacité du réseau mobile et la QoS offerte aux utilisateurs.

Dans le chapitre 6, nous présentons une adaptation du modèle présenté dans le chapitre 5 à la mobilité des utilisateurs. Nous proposons un modèle de contrôle *local* de la

consommation énergétique des stations de base qui dépend de l'emplacement des mobiles dans le réseau. En effet, ces positions changent dans le temps. Pour chaque stratégie de contrôle local proposée, les algorithmes de sélection de la nouvelle cellule de connexion pour un mobile lorsqu'il se déplace sont présentés. Les performances de ces stratégies sont analysées par simulations et comparées aux performances de la stratégie adoptée actuellement par les opérateurs mobiles ainsi qu'à celles des stratégies de contrôle global proposées dans le chapitre 5.

Enfin, dans le chapitre 7 nous concluons cette thèse par un bilan des travaux proposés et une discussion sur différentes perspectives possibles.

Chapitre 2

Présentation des réseaux mobiles

2.1 Introduction

Le réseau sans fil a révolutionné le monde de la téléphonie puisqu'il a permis aux utilisateurs de communiquer même lorsqu'ils sont mobiles.

Aujourd'hui, les réseaux mobiles sont victimes de leur propre succès. Initialement, les réseaux mobiles étaient sous-utilisés et permettaient d'offrir plus de services qu'un simple terminal mobile pouvait réaliser. Cependant, ces dernières années, la révolution des terminaux mobiles, notamment avec l'apparition des smart-phones, a conduit les opérateurs à proposer divers services qui sont plus gourmands en bande passante et qui ont des contraintes temps réel plus strictes. De plus, la diversité des services offerts a engendré une explosion du nombre de clients souscrits.

Le réseau mobile doit fournir une capacité suffisante pour servir tous les clients du réseau. Il doit également assurer un traitement plus rapide et plus adapté à la puissance des terminaux mobiles utilisés par les clients. Face à ces problèmes, les opérateurs doivent assurer le développement des réseaux mobiles tout en garantissant une certaine qualité de service (QoS) adaptée aux services offerts. De fait, ils doivent trouver le bon compromis entre, d'une part cette QoS, et d'autre part la capacité limitée et le coût de déploiement d'un tel réseau (coût énergétique, coût de développement, coût de maintenance, ...).

Dans ce chapitre, nous présentons dans un premier temps les notions de base des réseaux mobiles ainsi que leur évolution. Nous nous concentrons sur la dernière génération de ces réseaux. Nous détaillons par la suite, les deux principaux problèmes des opérateurs mobiles, à savoir, la gestion des ressources du réseau et sa consommation énergétique.

2.2 Les réseaux mobiles

Un réseau mobile est un réseau cellulaire déployé par un opérateur de télécommunication. Ce dernier propose à ses clients des services de téléphonie mobile et/ou d'accès à internet via son réseau, que ces clients soient mobiles ou nomades et quelle que soit

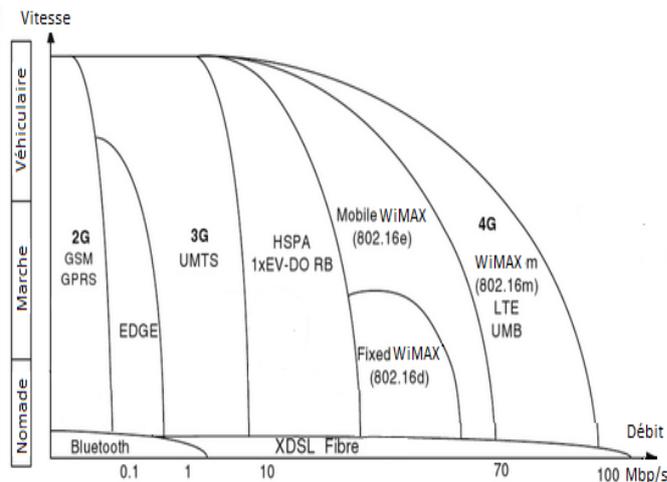


FIGURE 2.1 – Les différentes technologies des réseaux mobiles

leur vitesse de déplacement. Le réseau communique avec ses clients via les fréquences hertziennes qu'il exploite grâce à des émetteurs de signaux appelés *stations de base*. Étant donné la propagation des ondes et l'affaiblissement du signal dans les grandes zones de couverture, le déploiement de plusieurs stations de base (émetteurs) et un dimensionnement de la puissance d'émission sont nécessaires.

La transmission via ces fréquences existe depuis le 19^{ème} siècle pour la diffusion radio. Cependant, les premiers réseaux mobiles n'ont vu le jour qu'à la fin des années 1980. Cela est dû à la complexité du partage des ressources radio à cette époque entre les trafics ascendants et descendants échangés entre les clients et le réseau. Si ce partage n'est pas bien géré, des interférences peuvent se produire. Depuis, plusieurs générations de réseaux mobiles ont vu le jour au fil des années. La figure 2.1 présente les principales technologies de télécommunication et le débit qu'elles offraient par rapport au type de mobilité des utilisateurs. Différentes technologies ont été développées séparément un peu partout dans le monde (par exemple le réseaux développés en Allemagne 1958 – 1977) [8] [1] [9]. Dans ce qui suit, nous présentons les principales étapes de l'évolution des réseaux mobiles.

2.2.1 Réseaux mobiles de 1^{ère} génération

Le réseau dit de première génération (1G) est le réseau des années 1980. C'est le premier réseau cellulaire à utiliser les mêmes canaux de fréquences pour les cellules éloignées. Différents standards existaient à travers le monde : Advanced Mobile Phone Service- AMPS (USA), Total Access Coverage System - TACS (Grande bretagne), RADIOM2000 (France)...

Cette génération de réseau a permis la mobilité des utilisateurs et l'utilisation des premières cartes SIM. Techniquement, ce type de réseaux est basé totalement sur le signal analogique et c'est ce qui le caractérise. Le débit de transmission est de 10kbit/s et les communications sont modulées en fréquence FDMA (Frequence Devision Multiple

Access). Un canal est réservé exclusivement pour chaque communication pendant toute la durée de l'appel. C'est une commutation par circuits [1] [10].

2.2.2 Réseaux mobiles de 2^{ème} génération

La deuxième génération (2G) des systèmes de téléphonie mobile est caractérisée par l'utilisation du signal numérique, ce qui a permis la transmission des données de petite taille et l'apparition des messages textes échangés entre les clients. Une multitude de standards ont été considérés à travers le monde. Citons, par exemple, iDEN (USA), PDC (Japon) et GSM (développé en Europe et utilisé mondialement) [1].

Le réseau GSM (*Global System for Mobile communication*), en particulier, a connu un grand succès avec un nombre d'abonnés à ses services de communication qui a dépassé le milliard dans plus de deux cent pays (82% des téléphones mobiles). C'est un système de téléphonie mobile lancé par le Groupe Spécial Mobile (GSM) dans les années 90. Ce réseau exploite une plage plus large de fréquences Hertzienne que les réseaux précédents. Il est basé sur un système de partage de ressources TDMA (*Time Division Multiple Access*); les ressources d'une station de base sont partagées dans le temps entre les mobiles connectés [1] [11].

- **2G avancée**

A l'origine, le réseau GSM est un système dédié à la voix. Dans le but d'augmenter le débit de transmission, la commutation des paquets lors de la transmission de données était nécessaire. Cela a conduit à une révision des standards et à la naissance du réseau GPRS (General Packet Radio Service). Ce dernier est une version avancée du réseau GSM et offre un débit allant jusqu'à 80kbits/s. Il permet le partage des ressources en temps et en fréquence FD-TDMA (Frequency Division-Time Division Multiple Access), un mode hybride entre TDMA et FDMA. Les données sont transmises par paquets grâce au protocole TCP/IP¹ principalement. Ce protocole est utilisé pour Internet ce qui permet aux clients de profiter des services multimédia. Quant à la voix, elle est toujours transmise par commutation de circuit. La plupart des pays européens ont adopté cette norme à l'été 2001 [1] [10] [13].

Le besoin continu d'augmenter le débit de transmission et la gourmandise des clients en termes de débit ont mené les groupes de normalisation à repousser les limites des réseaux et faire évoluer le réseau GPRS. Cela a donné naissance à la norme EDGE pour Enhanced Data Rates over GSM Evolution. Ce nouveau réseau permet aux clients d'atteindre un débit trois fois plus rapide (240kbits/s) grâce à de nouveaux schémas de modulation et de codage. La norme EDGE est dite de la génération 2.75 [1].

1. Les protocoles TCP (Transmission Control Protocol) et IP (Internet Protocol) sont utilisés pour le transfert des données sur Internet et les connexions filaires [12].

2.2.3 Réseaux mobiles de 3^{ième} génération

Jusqu'à cette génération, les systèmes de communication ont beaucoup de succès et permettent la communication entre mobiles avec une QoS adaptée. Cependant, afin de généraliser les services multimédia et préparer les réseaux du futur, une nouvelle génération devait être définie. C'est la troisième génération (3G) des réseaux mobiles. Cette génération permet d'offrir avec plus de flexibilité des services plus gourmands en bande passante [1]. Elle est basée sur les deux types de commutation circuits et paquets ; circuits pour la voix et paquets pour les autres types de données (transferts de fichier, navigation web ...) [1].

L'organisation 3GPP (3rd Generation Partnership Project) a défini la norme UMTS pour *Universal Mobile Telecommunications System* en même temps que l'apparition des générations 2.5 et 2.75. La mise en place de cette technologie (UMTS) s'est faite progressivement et a duré quelques années puisque plusieurs équipements ont dû être remplacés. L'UMTS permet un débit allant jusqu'à 2Mbits/s dans certaines conditions. En effet, ce réseau s'est retourné vers les services multimédia et la mobilité des utilisateurs en utilisant un partage de ressources par code à large bande W-CDMA (Wideband Code Division Multiple Access). Cela a permis aux clients mobiles un accès haut débit à l'internet sans fil, visiophonie et messages vidéo, ainsi que la réception de la télévision sur le téléphone [13].

Les technologies retenues par l'ITU (International Telecommunication Union)² dans le cadre de la 3G ont été nommées IMT-2000 (International Mobile Telecommunication-2000). IMT-2000 est le résultat d'une collaboration globale entre les différents organismes de standardisation membres de l'ITU. Pour plus de détails, voir [14].

- **3G avancée**

Évolution de la technologie UMTS, la troisième génération dite *avancée* a été lancée durant les années 2000 avec l'apparition du standards HSPA (High-Speed Packet Access). Une version encore plus avancée est ensuite apparue, dite HSPA+. Ces standards sont dits réseaux 3G+ et 3G++.

Cette génération de réseaux est plus orientée vers une logique paquets et offre plus de capacité avec un débit plus élevé (allant jusqu'à 21Mbits/s). Cela favorise le développement des nouvelles applications, notamment dans le domaine du multimédia (visiophonie, diffusion de contenu vidéo et audio, MMS vidéo ou audio, ...). Comparé aux réseaux des génération précédentes (voir Figure 2.1), un réseau 3G avancé garantit l'accès aux données web et e-mails à ses clients mobiles même lorsqu'ils se déplacent à une vitesse plus élevée [13].

2. L'union internationale de télécommunication (ITU) gère les spectres des fréquences radio mondialement, ainsi que les orbites des satellites afin d'éviter toute interférence entre les pays. Elle fixe les normes des systèmes de communication afin d'assurer la bonne utilisation du spectre [14].

2.2.4 Réseaux mobiles de 4^{ième} génération

Avec l'évolution du marché des terminaux mobiles (smart-phones, tablettes, notebooks, ...) les technologies de télécommunication ont évolué vers une architecture dite tout-IP. Elles sont basées uniquement sur la commutation de paquets. En effet, rappelons que la génération précédente (3G) transmettait les données textes (fichier, navigation,...) par commutation de paquets tandis que les données voix était transmise par commutation de circuits. Dans cette génération de télécommunication (4G), aucune distinction entre la voix et les autres types de données n'existe. La commutation de paquets se fait grâce au protocole TCP/IP. Cette génération utilise la technique de codage et de multiplexage par fréquence dans le temps. C'est une combinaison des modes FDMA et TDMA utilisés séparément par les générations précédentes. Ce mode de partage de ressources est dit OFDMA pour Orthogonal Frequency Division Multiple Access.

Des efforts ne cessent d'être fournis dans le but de répondre aux défis des nouveaux besoins des utilisateurs en termes d'applications mobiles. Les réseaux mobiles LTE (Long Term Evolution) et WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) sont parmi les technologies tout-IP émergentes reconnues dans cette génération. Notons que le sigle IMT-advanced a été donné à ces technologies [14] [15] [1].

- **Réseau WiMAX**

Le réseau WiMAX est un regroupement de standards IEEE 802.16 développés par l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Le WiMAX a été conçu en 2001 pour les communications point à point pour des réseaux sans fil haut débit comme le Wi-Fi. Depuis, plusieurs versions ont été développées afin d'offrir plus de débit [16].

La variante IEEE 802.16e vise le marché de la communication mobile. Le réseau cellulaire de cette technologie fournit des accès Internet sans fil et offre des services mobiles avec des débits élevés (jusqu'à 70Mbits/s).

Les techniques de transmission et de modulation utilisées dans les réseaux WiMAX facilitent le déploiement dans des zones urbaines et dans les fortes agglomérations [15] [16].

- **Réseau LTE**

La technologie LTE est le résultat de l'évolution naturelle des réseaux de communication mobiles développés par le groupe de standardisation 3GPP. Comme elle a été présentée au début par 3GPP, la norme LTE n'a pas été reconnue comme une 4^{ième} génération de réseaux mobiles puisqu'elle ne satisfaisait pas les conditions posées par l'ITU. Pour cela, 3GPP a introduit des améliorations à la technologie LTE pour en faire un réseau de la nouvelle génération 4G [15] [5].

Le réseau LTE est conçu pour durer et est basé principalement sur les technologies GSM/EDGE et UMTS/HSPA. L'architecture de ce réseau se distingue par la séparation de l'entité de contrôle de l'entité réseau qui s'occupe du plan utilisateur. Cela permet une meilleure gestion des équipements du réseau et facilite les opérations d'intervention et de maintenance des opérateurs mobiles sur ces équipements. Cette séparation, offre

un temps de latence inférieur (estimé en moyenne à $5ms$) comparé à celui des autres réseaux (estimé à $300ms$ pour l'UMTS) [15] [1].

L'efficacité spectrale des réseaux LTE offre une capacité supplémentaire aux cellules. Cela est traduit par le nombre de mobiles servis simultanément par une même cellule et le débit qui leur est offert même lorsqu'ils se déplacent à une grande vitesse. En effet, l'architecture du réseau LTE reste fonctionnelle jusqu'à une vitesse de $350km/h$ (voir Figure 2.1).

Le groupe 3GPP a proposé la version avancée de LTE qui permet l'auto-configuration et l'auto-organisation des stations de base. C'est-à-dire que les paramètres de cette dernière s'adaptent aux différents changements qui peuvent se produire dans le réseau (déploiement d'une nouvelle cellule voisine, variation d'allocation spectrale, ...).

Le réseau LTE avancé permet également le déploiement des petites cellules par l'opérateur mobile lui même ou par ses clients. Ce type de cellules vient compléter localement la couverture régulière du réseau et lui offre une capacité supplémentaire. Ainsi, le réseau est dit hétérogène [5] [15] [1]. Nous détaillons l'architecture du réseau LTE hétérogène de la 4^{ième} génération dans la section 2.3.

2.2.5 Réseaux mobiles du future (5^{ième} génération)

L'union internationale de télécommunication (ITU) a mis au point une feuille de route mondiale pour le développement des systèmes mobiles 5G, auxquels elle a donné le nom de IMT-2020 le 19 juin 2015.

Le secrétaire général de l'ITU, Houlin Zhao, a déclaré : *Les prochaines étapes de la technologie mobile 5G font maintenant beaucoup parler d'elles dans l'industrie. L'attention est maintenant centrée sur la possibilité de créer une société connectée en continu à l'horizon 2020 et au-delà. Une société dans laquelle les personnes aussi bien que les objets, les données, les applications, les systèmes de transport et les villes seraient regroupés au sein d'un environnement placé sous le signe des communications intelligentes en réseau. L'ITU continuera à œuvrer en partenariat avec l'industrie mondiale des systèmes mobiles et avec les organismes gouvernementaux pour assurer la réalisation pratique des IMT-2020* [17].

Les objectifs de cette génération comprennent des améliorations de l'expérience utilisation des clients, le respect de vie privée et ainsi que la sécurité des données. Cela permettra d'offrir une large gamme de services émergents. Des améliorations de l'architecture du réseau visent également sa flexibilité et son efficacité énergétique et opérationnelle. [17] [18]

2.3 Les réseaux LTE hétérogènes

L'architecture du réseau LTE est simplifiée par rapport aux autres réseaux. Elle est caractérisée par un nombre de nœuds de réseau réduit. L'architecture du réseau LTE est composée de trois entités fonctionnelles : le terminal mobile de l'utilisateur, le réseau d'accès et le réseau cœur. Ces entités constituent la base de tout réseau mobile (voir Figure 2.2). Le rôle de chacune d'entre elles est comme suit :

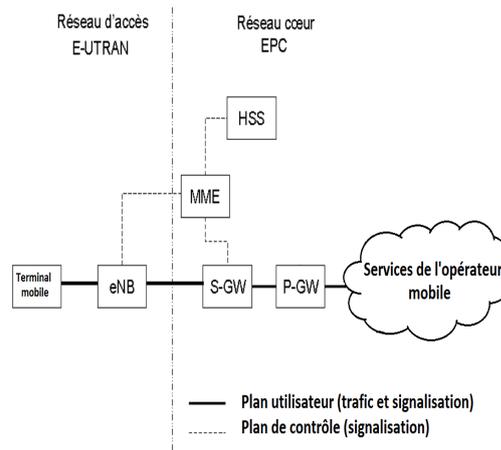


FIGURE 2.2 – Équipements du réseau LTE

- Le terminal mobile de l'utilisateur (téléphone, smart-phone ou tablette) lui permet de communiquer avec le réseau et de profiter des services qu'il offre (navigation, appel, ...).
- Un réseau d'accès appelé E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network) qui comporte les stations de base appelées *eNodeB* (evolved Node B). Ceux sont des nœuds du réseau composés d'antennes radio. Ils assurent la connexion via les ondes Hertziennes entre le terminal mobile et le cœur du réseau. Les stations de base eNodeB ou eNB fournissent un accès radio à des utilisateurs mobiles. Dans le cas de déploiement de petites cellules, l'architecture de E-UTRAN comprend également les Home eNodeBs (HeNBs) et les HeNB Gateway (HeNB GW) qui forment les petites cellules du réseau appelées *femto-cellules*. Dans le réseau E-UTRAN, les fonctions supportées par une HeNB sont les mêmes que celles supportées par une eNB. L'avantage des réseaux de la 4G est que toutes les stations de base adjacentes peuvent communiquer directement via des interfaces appelées X2. Cela permet une meilleure gestion des déplacements des mobiles sans revenir au réseau cœur [19] [5].
- Un réseau cœur appelé EPC qui est l'acronyme de *Evolved Packet Core*, comporte principalement plusieurs passerelles appelées S-GW (*Serving Gateway*) qui assurent le routage des données de l'utilisateur mobiles(y compris la voix) de plusieurs eNB ; c'est le plan utilisateur. Selon les données transférées, le routage se fait depuis la station de base qui le sert vers les stations de base distantes, via des routeurs, vers les stations de base des autres opérateurs ou vers le réseau Internet. Le réseau cœur est dit tout IP puisque le transport des données est basé sur le protocole TCP/IP comme déjà mentionné. Le cœur du réseau LTE comporte également des équipements qui gèrent la signalisation de contrôle entre les terminaux mobiles et l'EPC (plan de contrôle). Parmi ces équipements, la MME (Mobility Management Entity) qui assure le contrôle et les droits d'accès aux stations de base en consultant les bases de données du réseau dites HSS (*Home Subscriber Server*). L'entité MME gère également la connexion et la sécurité des abonnés.

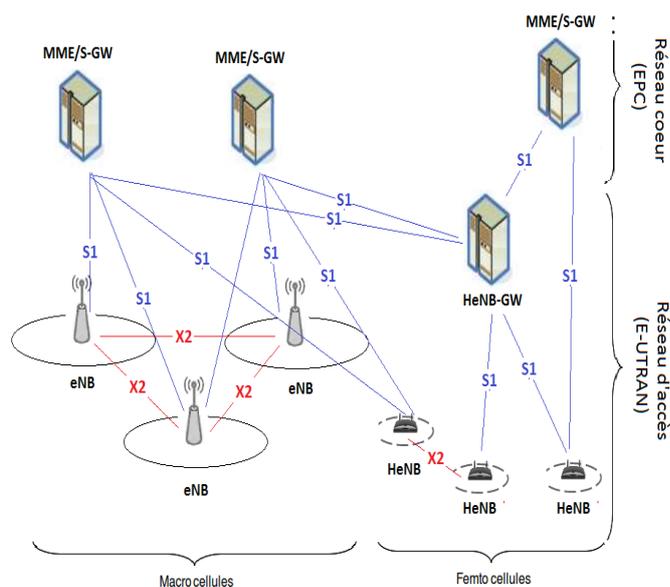


FIGURE 2.3 – Architecture du E-UTRAN

L'EPC comporte également une ou plusieurs passerelles appelées PGW (*Packet Data Network Gateway*) qui attribuent les adresses IP aux terminaux LTE et servent également de passerelles vers le réseau Internet.

Dans le cadre du déploiement des HeNB, des passerelles HeNB-GW sont considérées dans le réseau cœur afin de gérer plusieurs HeNB et les connecter à l'EPC. Une station de base HeNB peut également se connecter à une passerelle S-GW directement via l'interface S1 lorsque cette dernière existe entre eux. La HeNB-GW apparaît à la MME comme une station de base classique (eNB). Cependant, pour les HeNB, la passerelle HeNB-GW apparaît comme une MME, comme le montre la figure 2.3 [19] [5].

L'architecture des réseaux LTE se distingue par la séparation de l'entité de contrôle qui est le module de gestion de la mobilité MME de l'entité réseau qui s'occupe du plan de données de l'utilisateur et qui est la S-GW. Par conséquent, cela offre aux opérateurs mobiles la possibilité de choisir l'équipement approprié et de l'installer à des endroits adaptés aux meilleures topologies qui puissent faciliter les opérations de maintenance. En effet, le réseau d'accès E-UTRAN doit fournir des accès avec des débits élevés et une capacité réseau capable de supporter un grand nombre d'abonnés à des services et à des applications à très hauts débits [15] [19].

Dans le but d'augmenter la capacité du réseau, les opérateurs mobiles doivent déterminer le bon compromis entre la taille des cellules et la densité de population dans les zones de couverture. Le déploiement de différentes tailles de cellules est devenue une réalité dans les réseaux de la 4^{ème} génération. Ainsi, le réseau mobile est dit hétérogène si des petites stations de base sont déployées dans le réseau macrocellulaire existant [20] [21]. Les cellules sont ainsi classées en fonction de la taille de la zone qu'elles couvrent (voir Figure 2.4). Nous distinguons plusieurs types de cellules : macro, micro,

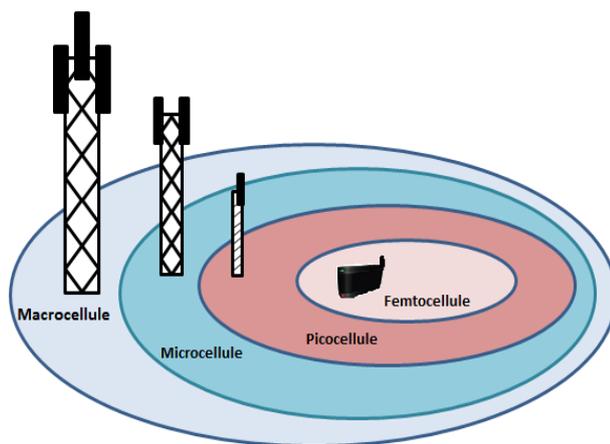


FIGURE 2.4 – Types de cellules selon la zone de couverture.

pico et femto.

- **Macrocellule**

C'est une cellule de base qui constitue le réseau LTE et peut couvrir jusqu'à 30km de rayon. Une macrocellule est un site radio qui comporte une antenne relais ainsi qu'une station de base. Rappelons que dans les réseaux LTE, les macrocellules sont appelées *eNodeB* (evolved node B) et sont équivalents aux *Nodes B* des réseaux UMTS (3G), et aux BTS (*Base Transceiver Station*) des réseaux GSM (2G).

Comme déjà mentionné, une station de base eNodeB utilise le protocole OFDMA pour communiquer avec les terminaux mobiles présents dans sa zone de couverture. Une macrocellule a généralement 3 secteurs, chacun correspondant à une ou plusieurs antennes physiques orientées dans la même direction, chacune couvrant un angle de 120° [22].

- **Microcellule**

Une microcellule couvre une zone plus petite (quelques kilomètres) que les macrocellules. Elle est déployée à l'échelle d'un quartier [23]. Les microcellules fournissent une couverture et une capacité supplémentaire au réseau mobile dans les zones où le déploiement des macrocellules est plus difficile ou plus coûteux.

- **Picocellule**

Une picocellule est une petite cellule qui couvre une zone plus petite (quelques centaines de mètres) comparée à une microcellule. Elle est déployée à l'échelle d'un grand bâtiment comme une usine ou un centre commercial, dans le but d'améliorer la couverture du réseau dans ces zones à forte densité [23].

- **Femtocellule**

Cette cellule est déployée à l'échelle d'une maison ou d'un appartement. Le diamètre de sa couverture peut aller de $10m$ à $100m$. La station de base d'une femtocellule est un point d'accès qu'un opérateur mobile propose à son client afin d'améliorer la connectivité dans la zone de couverture et principalement chez lui. Dans les réseaux LTE, ce point d'accès est un HeNB.

Les femtocellules sont caractérisées par une faible puissance d'émission et une faible consommation d'énergie en comparaison avec les autres types de cellules. Une femtocellule peut servir jusqu'à 8 clients mobiles simultanément via les ondes radio utilisées habituellement pour les réseaux WiFi [24] [20]. Ce type de station de base est connecté au réseau mobile via une connexion Internet haut débit (par un routeur câble, xDSL, ...).

Les opérateurs mobiles ont opté également pour les petites cellules dites *outdoor* (extérieure). Elles sont généralement placées dans les gares et les places publiques où la couverture des autres stations de base n'est pas assurée ou insuffisante.

L'industrie des télécommunications a trouvé son intérêt dans les femtocellules. En effet, les petites stations de base, de faible puissance mais peu coûteuses, améliorent la capacité du réseau, en termes de bande passante offerte, ainsi que sa couverture intérieure (*indoor*) et extérieure (*outdoor*). Pour l'utilisateur final, la solution des femtocellules fournit une meilleure qualité des appels à l'intérieur des grands immeubles ou dans des espaces publics denses, et réduit le coût des appels à la maison. La durée de vie de la batterie des terminaux mobiles est augmentée grâce à la faible puissance de radiation.

D'un point de vue technologique, les femtocellules sont aussi caractérisées par leur capacité à interagir facilement avec le réseau cellulaire traditionnel, au niveau de toutes les couches de la pile protocolaire. Elles effectuent des tâches comme la gestion des *handovers*, la gestion des interférences, la facturation et l'authentification. Notons que le fonctionnement de la couche physique et la couche MAC (*Media Access Control*) des femtocellules est le même dans les réseaux LTE et dans les réseaux WiMAX. Cela est dû à la même conception des couches protocolaires (physique et MAC) dans les deux architectures, utilisant l'accès multiple par répartition en fréquences orthogonales (OFDMA) [25] [24].

L'objectif d'une utilisation massive des femtocellules, à l'intérieur (centres commerciaux, entreprises,...) ou à l'extérieur (places publiques, parcs,...) est de réduire les coûts d'investissement des opérateurs et en même temps d'augmenter d'une certaine manière la capacité des réseaux ($1Gbps/Km^2$) grâce à un taux de réutilisation de fréquences extrêmement élevé [26].

Dans tout ce qui suit, nous considérons un réseau LTE hétérogène constitué de macrocellules et de femtocellules uniquement.

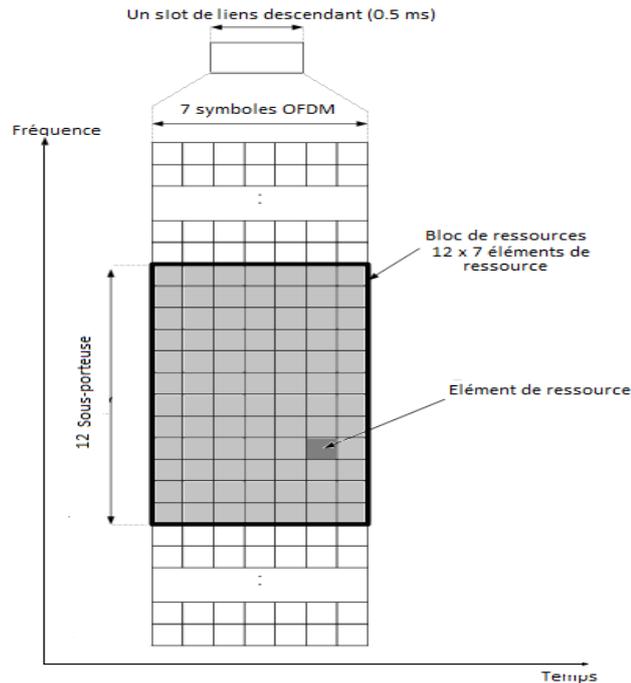


FIGURE 2.5 – Ressources physiques d’une station de base

2.4 Gestion des ressources dans les réseaux mobiles

Chacune des stations de base du réseau (grande ou petite) dispose d’une plage limitée de fréquences dans le temps afin de communiquer avec les clients actifs dans sa zone de couverture et transmettre leurs données. Comme mentionné précédemment, les ressources d’une station de base sont partagées entre les utilisateurs en temps et en fréquences dans les réseaux LTE de la 4G ; OFDMA pour l’émission (Downlink) et SC-FDMA (Single-Carrier Frequency Division Multiple Access) pour la réception (uplink). La figure 2.5 est une représentation temporelle et fréquentielle des ressources physiques d’une station de base telle que l’unité minimale qu’une station de base alloue dynamiquement à un terminal mobile est dite *bloc de ressources* radio. Ce dernier est constitué de 12 sous-porteuses chacune de 15kHz par un intervalle de 0.5ms . Cet intervalle représente un slot de temps de 7 symboles³ (OFDM ou SC-FDM). Un bloc de ressources couvre une bande passante de 180kHz de fréquences consécutives. Ainsi, l’allocation de canaux de bandes passantes 1.4, 3, 5, 10, 15 et 20MHz correspond à 6, 15, 25, 50, 75 et 100 blocs de ressources qui peuvent avoir des fréquences différentes non adjacentes (voir [27] pour plus de détails).

Chaque station de base gère un nombre limité de bandes de fréquences, ce qui limite

3. Un symbole est un ensemble de bits à transmettre [27].

le nombre total de blocs de ressources qu'elle peut allouer à ses clients connectés. De plus, les utilisateurs mobiles demandent des quantités de ressources différentes selon la qualité du signal de transmission et selon le service qu'ils utilisent (voix, navigation, vidéo,...). Pour cela, chaque station de base doit bien gérer son allocation de blocs de ressources et les partager entre les clients connectés afin de leur garantir une QoS.

Le problème de partage de ressources existe dans différents domaines [28]. Plusieurs modèles de partage de ressources entre clients sont utilisés dans la réalité, quel que soit le type de la ressource (bande passante, accès Wi-Fi, électricité, information, ...). Citons, par exemple, le partage d'électricité entre les clients fournisseurs (ayant des panneaux solaires sur leur toits) et les clients consommateurs d'énergie d'EDF (Électricité De France)[29]. Une communauté de partage d'accès Wi-Fi existe également et s'appelle FON [30]. Cette dernière permet aux membres de profiter de l'accès Internet via le réseau Wi-Fi de chacun à travers le monde. A notre connaissance, dans les réseaux mobiles, deux modèles de partage de ressources entre clients mobiles ou entre stations de base existent dans la littérature : le modèle de partage de ressources entre opérateurs et le modèle de partage d'accès aux femtocellules. Nous présentons dans ce qui suit le principe de chacun des deux modèles.

2.4.1 Partage de ressources entre opérateurs mobiles

Compte tenu du coût et de la complexité des réseaux à grande échelle ainsi que l'absence de nouvelles fréquences, les auteurs dans [31] [32] proposent aux opérateurs mobiles de se partager l'accès à leurs équipements. Cela permet d'accroître la capacité du réseau et de réduire les coûts de déploiement et de fonctionnement de l'infrastructure réseau. Trois approches de partage de ressources cellulaires sont possibles : en termes de capacité, de spectre et de l'infrastructure du matériel.

- **Partage de capacité**

Ce type de partage est considéré comme un équilibrage de la charge entre plusieurs opérateurs mobiles. Cela inclue également un partage de spectre puisque des mobiles peuvent être servis par les stations de base d'un autre opérateur. Lorsque le réseau d'un opérateur mobile est chargé, le trafic supplémentaire de ce dernier est transféré vers le réseau d'un autre opérateur si sa capacité disponible permet ce transfert et qu'un accord existe déjà entre les deux opérateurs mobiles. Ce partage permet de gérer le flux de trafic occasionnel sans aucune expansion coûteuse des ressources. Il permet également de réduire les coûts des opérateurs mobiles tout en offrant une meilleure QoS à ses clients [31].

- **Partage de spectre**

Plusieurs travaux de recherche proposent le partage de spectres dans les réseaux mobiles. En effet, acquérir du spectre inutilisé par un opérateur permet d'augmenter la capacité du réseau d'un autre [33] même en considérant une couverture de femtocellules [34]. L'utilisation spectrale est également améliorée si un découpage dynamique est considéré [35] [36].

- **Partage d'équipements**

Ce type de partage a été proposé également par le groupe de standardisation

3GPP. Il a proposé dans [32] aux opérateurs mobiles de partager certains équipements du réseau cœur, notamment les passerelles SGW et les entités MME. Dans [31], les auteurs proposent le partage des stations de base entre les opérateurs mobiles via une interface virtuelle. Ils proposent un processus de partage coordonné et unifié de l'architecture par l'introduction d'une nouvelle entité de partage de réseau appelée SE (Sharing Entity). Cette entité permet la création dynamique, la modification et la résiliation des contrats de partage de ressources entre les opérateurs. L'entité de partage est une entité indépendante et gérée soit par une partie tierce ou une alliance des opérateurs mobiles. La SE coordonne les offres et les demandes d'une ou de plusieurs entités de contrôle MME des réseaux participants. La MME et la SE négocient et finalisent le contrat de partage. Ainsi, les auteurs dans [31] proposent de considérer une seule entité SE qui gère tous le voisinage de la zone de couverture des réseaux.

2.4.2 Partage d'accès aux femtocellules

Ce modèle propose aux clients d'un même opérateur mobile d'autoriser l'accès au réseau aux autres clients qui se déplacent via leur boîtier femto [37]. Il est inspiré du modèle de partage d'accès Wi-Fi proposé par la compagnie FON. Ainsi, deux clubs sont considérés : le club des *clients fournisseurs d'accès* et le club des *clients demandeurs d'accès*. Chaque client de l'opérateur mobile est un membre dans l'un de ces clubs ou les deux en même temps. Un client fournisseur d'accès possède un point d'accès de femtocellule qu'il propose aux clients demandeurs. Il bénéficie ainsi d'un gain en jetons qu'il peut échanger contre de l'argent ou contre un accès au réseau Wi-Fi d'un autre client fournisseur quand il se déplace. Un client demandeur est un utilisateur mobile qui souhaite accéder au réseau. Il achète des jetons (s'il n'en possède pas) auprès de l'opérateur mobile et les échange contre un accès au réseau Wi-Fi d'un client fournisseur.

Le but de [37] est de proposer un modèle de partage d'accès aux ressources entre les clients fournisseurs et les clients demandeurs d'accès avec des garanties de QoS et une valeur économique ajoutée. Le modèle est un mécanisme distribué, géré principalement par les membres des clubs et non pas par l'opérateur mobile. Il est basé sur le système de comptabilité à base de jetons pour les réseaux peer-to-peer TBAS (Token Based Accounting System). C'est un modèle d'échange de services entre pairs qui évite les cas de profit. Il fait appel à deux acteurs, le propriétaire de la station de base femto en tant que client fournisseur de service, et l'utilisateur mobile en tant que client demandeur de service. Une entité centrale nommée le Banquier fournit un nombre de jetons propres à chaque client demandeur, qui va les dépenser ensuite dans les services fournis. Dans ce cas, l'opérateur mobile joue le rôle du banquier. L'application du TBAS des réseaux peer-to-peer sur le modèle de partage d'accès aux femtocellules est présenté dans la figure 2.6 [5].

- (i) Quand un client demandeur de service a besoin d'une connexion, et qu'un autre client fournisseur peut la lui offrir, il envoie quelques jetons à ce dernier contre une quantité de bande passante.
- (ii) Le client fournisseur de service reçoit ces jetons comme des jetons étrangers. Pour

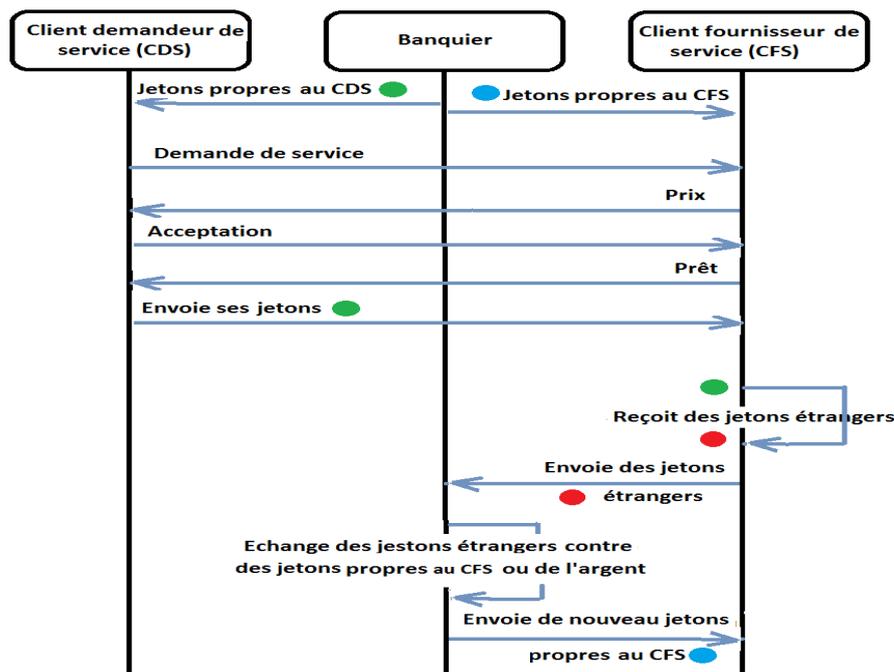


FIGURE 2.6 – Messages échangés pour le partage d'accès aux femtocellules

des raisons de sécurité, le client fournisseur de service ne peut pas utiliser les jetons étrangers directement pour ses propres besoins.

- (iii) Les jetons étrangers sont envoyés au banquier pour les échanger contre des jetons propres qui lui seront propres ou contre de l'argent.

Le système TBAS appliqué au problème de partage d'accès aux femtocellules permet d'éviter les cas de profit en appliquant une équité entre les membres. Il permet aussi une meilleure couverture réseaux et plus de capacité pour les opérateurs mobiles, et donc, plus de revenus générés.

Le modèle de partage d'accès aux femtocellules propose un contrôle du partage de la bande passante afin de maximiser le gain de chacun (clients fournisseurs et clients demandeurs). Pour cela, une quantité de ressources est allouée à chaque client demandeur selon sa requête étant donnée la quantité limitée de bande passante qu'un client fournisseur dispose. Ainsi, chaque client demandeur d'accès doit bien formuler sa demande de ressources en tenant compte des demandeurs concurrents qui souhaitent accéder aux ressources du même client fournisseur. En se basant sur la théorie des jeux, les auteurs dans [37] proposent de modéliser le problème de partage de ressources comme un jeu. C'est-à-dire que le groupe de clients demandeurs qui souhaitent accéder aux ressources d'un même client fournisseur jouent entre eux afin de formuler leurs requêtes de ressources et maximiser leurs gains, étant données les demandes de chacun d'entre eux.

Ce modèle permet de garantir un accès équitable aux femtocellules entre les clients demandeurs et les clients fournisseurs d'accès. Cependant une synchronisation entre les

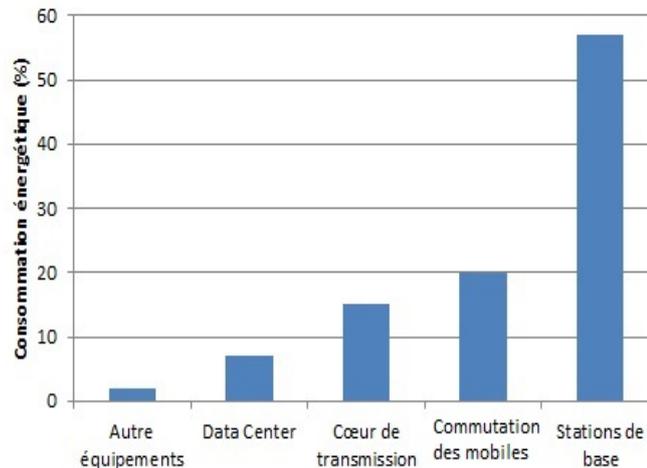


FIGURE 2.7 – La consommation d’énergie des équipements du réseau

joueurs (clients demandeurs) est nécessaire pour le jeu puisque la quantité de ressources disponible doit être connue. De plus, étant donné la taille des femtocellules, la mobilité des utilisateurs et la vitesse à laquelle ils se déplacent ne permettent pas au modèle de partage des ressources d’être efficace. Dans cette thèse, nous avons choisi d’adapter ce modèle de partage de ressources aux réseaux LTE hétérogènes en considérant la mobilité des utilisateurs et les contraintes temps réel. Des détails sur ces travaux sont présentés dans le chapitre 4.

2.5 La consommation d’énergie dans les réseaux mobiles

Avec l’augmentation considérable du nombre d’abonnés chez les opérateurs mobiles et la diversité des services offerts, les réseaux mobiles consomment de plus en plus d’énergie. D’une part, le terminal mobile (smart-phone) consomme de l’énergie afin de gérer ses fonctions, notamment son interface réseau (réception/transmission). D’autre part, les équipements du réseau d’accès et du réseau cœur consomment de l’énergie pour le traitement et la réception/transmission des signaux des utilisateurs. Réduire la consommation énergétique des réseaux mobiles est devenue un besoin réel et cela pour différentes raisons commerciales et environnementales. En effet, la crainte d’un épuisement des ressources matérielles, le réchauffement climatique, les problèmes politiques et de sécurité d’approvisionnement, ainsi que la combinaison de ces phénomènes font que le coût énergétique de ces réseaux augmente d’une façon exponentielle.

Nous nous intéressons dans ce qui suit aux problèmes d’énergie auxquels les opérateurs mobiles sont confrontés pour le déploiement de leurs réseaux. Ils doivent trouver le bon compromis entre, d’une part, la QoS qu’ils doivent offrir à leurs clients mobiles, et d’autre part, le coût engendré en offrant à ces clients plus de capacité [24] [22].

La figure 2.7 représente la répartition de l’énergie consommée par différentes parties

du réseau mobile. Les opérateurs mobiles ont constaté que la partie du réseau qui consomme le plus d'énergie est le réseau d'accès. En effet, les stations de base sont toujours allumées afin d'assurer la couverture du réseau mobile (jusqu'à 30km pour les macro) grâce à leur puissance d'émission. De plus, un système de refroidissement de ces équipements et une maintenance en continue doivent être assurés. Pour cela, la station de base consomme de plus en plus d'énergie. Cependant, les opérateurs ont constaté que le facteur clé reste la charge du trafic servi par la station de base, en particulier la quantité de ressources allouées pour chaque client mobile servi. L'évolution de la consommation énergétique des stations de base des macrocellules et des femtocellules est présentée dans la figure 2.8 en fonction de la charge. Comme mentionné plus haut, à l'inverse des macrocellules, les femtocellules ont des petites stations de base de faible puissance (couvrant jusqu'à 100m), ce qui explique que les stations de base des macrocellules consomment plus d'énergie et qu'elles sont plus sensibles à la variation de la charge, comparées aux stations de base des femtocellules.

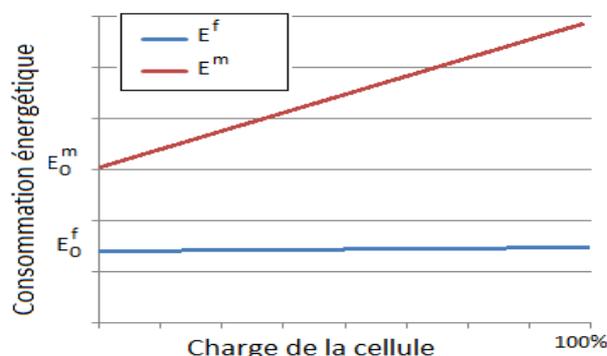


FIGURE 2.8 – Évolution de la consommation énergétique d'une station de base

Selon la figure 2.8, la consommation énergétique d'une station de base (d'une femtocellule E^f ou d'une macrocellule E^m) est une fonction de la charge [38] [39] [40]. Elle est modélisée par une fonction affine $E(x)$ de la forme :

$$E(x) = ax + b \quad (2.1)$$

Le coefficient directeur a dépend des paramètres physiques de la station de base et représente le coût énergétique par bloc de ressources alloué. L'ordonnée d'origine b de cette fonction est le coût énergétique de la station de base lorsqu'aucun mobile n'est connecté à elle (E_0^f pour les femtocellules et E_0^m pour les macrocellules). Dans ce travail, nous considérons les paramètres physiques présentés dans le tableau 2.1 [38].

Réduire la consommation énergétique des stations de base fait partie des objectifs des réseaux 4G. Les équipements des réseaux de cette génération, comme les eNB par exemple, permettent déjà une économie d'énergie, comparés aux équipements des générations précédentes. Les opérateurs mobiles ont considéré également les petites cellules (femto et pico) dans le but d'éviter les situations de surcharge de trafic des macrocellules et les pics de consommation énergétique de leurs stations de base. Cependant, la tendance du moment est de penser "Green", c'est-à-dire qu'on s'attend à ce que les réseaux

Type de la station de base	Coût énergétique (W)		Coût énergétique par charge
	Charge nulle	État de veille	
Macro	260	150	188
Pico	103	69	32.5
	96.2	62	1.5
	13.6	8.6	1
Femto	9.6	5.8	0.8

TABLE 2.1 – Consommation énergétique de certain types de stations de base

du futur soit plus éco-énergétiques. Certaines solutions consistent à se concentrer sur les équipements physiques de la station de base, notamment l'utilisation de l'énergie renouvelable pour alimenter ces équipements [41]. Ces solutions sont encore insuffisantes et le besoin de réduire la consommation d'énergie du réseau (les stations de base en particulier) est toujours constaté.

D'autres solutions proposées dans la littérature, sont basées sur la gestion et le contrôle du réseau [39] [40]. Elles ne nécessitent aucun changement dans l'architecture ni dans ses équipements. Nous avons choisi de présenter dans ce qui suit deux solutions possibles pour la réduction de la consommation énergétique du réseau : la configuration dynamique et la désactivation (ou mise en veille) des stations de base. Ces solutions sont celles qui se rapprochent le plus des modèles que nous proposons dans le cadre des travaux de cette thèse.

2.5.1 Configuration dynamique des stations de base

Cette solution consiste à ajuster la taille des cellules selon le trafic présent dans la zone de couverture [42]. Les auteurs s'intéressent à la consommation énergétique des grandes stations de base (macrocellules) et proposent de configurer leur puissance d'émission afin de réduire la couverture de la cellule lorsqu'elle est faiblement chargée. Cela permet d'économiser l'énergie consommée pour couvrir des zones où peu de mobiles sont connectés au réseau. Cette solution ne satisfait pas nécessairement les objectifs des opérateurs. En effet, la taille de la zone de couverture est parmi les critères d'évaluation du réseau d'un opérateur mobile. Ainsi, le but de ce dernier est de garantir la puissance d'émission sur toute cette zone de couverture [23].

2.5.2 Désactivation des stations de base

Certains travaux de recherche se concentrent sur la désactivation des stations de base ou même de les mettre en état de veille [43] [6] [7].

Les auteurs dans [43] et [6] se concentrent sur la variation du trafic quotidien. Leur objectif est de configurer les stations de base des femtocellules selon le trafic. Lorsque ce dernier est très faible (selon un seuil fixé) certaines femtocellules sont désactivées.

Dans [43], le processus de désactivation est considéré afin de réduire la consommation énergétique du réseau d'accès lors des périodes de faible trafic (à 02 : 00 par exemple). Ils adoptent un schéma de désactivation des stations de base des macrocellules dans un réseau homogène (les petites cellules ne sont pas considérées). Ils proposent également de procéder à plusieurs désactivations de stations de base de macrocellules par jour dans le but de réduire progressivement le nombre de stations de base actives.

Le modèle proposé dans [43] considère que la consommation énergétique des stations de base des macrocellules est constante dans le temps, ce qui ne semble pas réaliste. En effet, selon [38], la consommation dépend linéairement de la charge. Cette dernière varie selon le trafic quotidien ainsi que le trafic transféré des femtocellules désactivées vers les macrocellules qui les couvrent.

Dans [6], les auteurs considèrent un réseau hétérogène avec des stations de base de différentes tailles (macro, micro, pico, ...). Ces stations ont différentes modes de consommation d'énergie. Celle des stations de base des macrocellules est plus sensible à la charge et à l'allocation de ses ressources radio, comparée à celle des stations de base des autres types de cellules. Les auteurs proposent deux algorithmes de mise en état de veille des petites stations de base (pico et femto). Le premier consiste à sélectionner une seule petite station de base à mettre en veille, tandis que le deuxième consiste à en sélectionner plusieurs. Le but de ces algorithmes est de déterminer l'instant le plus adéquat pour mettre une station de base en veille. Les auteurs ont prouvé que la mise en veille ou même la désactivation des petites stations de base ne permet pas d'économiser plus d'énergie après un certain temps. Ce modèle ne garantit pas la réduction de la consommation énergétique du réseau. Cela est vrai puisque lorsqu'une petite station de base est sélectionnée pour être désactivée, son trafic est transféré vers la station de base d'une cellule (macro ou autre) voisine. Cette dernière risque de consommer plus d'énergie que la station de base initiale, et aucun gain ne peut être constaté.

Dans [7], les auteurs modélisent le réseau par un processus de Markov à temps discret dans le but de contrôler la désactivation/activation des stations de base des femtocellules. Ce modèle dépend uniquement de l'état actuel du système ainsi que des informations disponibles telles que la géolocalisation des mobiles et la charge des cellules.

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un bref historique des réseaux mobiles et son évolution au cours de ces dernières années. En nous concentrant sur les réseaux de dernière génération (4G), nous avons présenté leur architecture ainsi que les problèmes auxquels les opérateurs mobiles font face. Nous avons présenté et discuté quelques solutions proposées dans la littérature afin de résoudre certains de ces problèmes, notamment la gestion des ressources et le coût énergétique des stations de base.

Étant donné que le réseau LTE a été conçu pour faciliter la mobilité des utilisateurs, nous présentons dans le chapitre 3 la gestion de la mobilité des utilisateurs dans ce type de réseau. Cela permettra d'introduire par la suite les approches que nous proposons afin d'améliorer les performances du réseau et garantir une QoS aux utilisateurs dans le cadre de la mobilité.

Chapitre 3

La mobilité dans les réseaux LTE Hétérogènes

3.1 Introduction

Le but des opérateurs mobiles est de garantir la qualité des services offerts aux clients connectés à leurs réseaux. Cependant, la connexion d'un utilisateur dépend de la position du mobile et les cellules détectées à cette position. Lorsque l'utilisateur se déplace, l'ensemble des cellules détectées change à cause de la limite de propagation du signal de transmission. Ainsi, dans les réseaux mobiles actuels, l'objectif des opérateurs est de garantir une bonne QoS (pour la vidéo HD par exemple) sans interrompre la connexion du mobile, même lorsqu'il se déplace à une grande vitesse.

En effet, la mobilité des utilisateurs a été un élément important dans l'évolution des réseaux cellulaires. Dans la génération actuelle des réseaux mobiles (4G), en particulier les réseaux LTE, la continuité des services offerts par les opérateurs est garantie même lorsque le mobile se déplace à une vitesse allant jusqu'à 300km/h . Cependant, plus la vitesse des déplacements est élevée, plus la QoS se dégrade (voir Figure 2.1, page 8). De plus, avec l'augmentation du nombre d'utilisateurs dans le réseau et la diversité des services en ligne offerts, la continuité de la connexion est de plus en plus exigée.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la mobilité des utilisateurs dans les réseaux LTE et la QoS offerte pendant leurs déplacements. En particulier, nous analysons le principe de sélection de la cellule de connexion des utilisateurs lors de chaque handover ainsi que l'anticipation de ce dernier. Pour une meilleure gestion de la mobilité des utilisateurs, différentes approches sont proposées dans la littérature telle que la prédiction de la mobilité des utilisateurs. Nous discutons dans ce qui suit de quelques unes d'entre elles, notamment celles qui sont adaptées au déploiement des petites cellules (femto et pico).

Dans les sections suivantes nous présentons d'abord le principe du processus de handover dans un réseau LTE ainsi que les critères de sélection de la nouvelle cellule de connexion. Nous présentons ensuite, quelques techniques de sélection ainsi que différentes méthodes de prédiction de la mobilité proposées dans la littérature.

3.2 Gestion de la mobilité

La mobilité d'un utilisateur dans un réseau cellulaire correspond à un changement du canal radio utilisé par son terminal mobile. Afin de maintenir la connexion d'un mobile lors de sa mobilité, un ensemble d'opérations, appelé *handover*, est réalisé. Un changement de canal radio peut être dû au déplacement du mobile ou pour des besoins de gestion du réseau entraînant potentiellement un changement de la station de base de connexion.

Lorsque le mobile se déplace, l'ensemble des cellules détectées par son terminal mobile change, ce qui entraîne un changement de canal radio et un changement de la station de base à laquelle il est connecté. Afin d'équilibrer la charge entre les cellules, le réseau peut également décider de changer la station de base de connexion du terminal mobile. Le handover dans ce cas est dit *Inter-eNodeB*. Lorsque le terminal mobile change de canal radio sans changer la station de base à laquelle il est connecté, le handover est dit *Intra-eNodeB* [19, 44].

Notons que le handover entre deux stations de base appartenant à deux réseaux mobiles différents peut être considéré. Il est appelé dans ce cas *Roaming*. Nous nous intéressons dans ce qui suit au handover nécessitant un changement de station de base au sein d'un même réseau, c'est-à-dire le handover *Inter-eNodeB*.

Lorsque le terminal d'un client mobile est connecté à une cellule, il mesure en continu l'intensité du signal de transmission des cellules détectées (cellule de rattachement et cellules voisines). Il mesure également le taux d'erreur constaté sur les paquets échangés avec la station de base de la cellule de connexion. Le terminal envoie en continu (périodiquement) un rapport de ces mesures à cette station de base afin de gérer sa mobilité dans le réseau. D'autres mesures sont également considérées pour la gestion des handovers, notamment le niveau d'interférences et le délai de propagation. La dégradation de ces mesures est dû à la portée limitée du signal radio émis par la cellule ainsi que son atténuation après sa propagation dans l'espace. La connexion d'un terminal mobile à une cellule est donc évaluée selon ces mesures.

Lorsque le signal de transmission entre le terminal mobile et la cellule de connexion faiblit, cette dernière déclenche le processus de handover. Cela arrive le plus souvent lorsque le mobile se déplace et s'apprête à quitter la zone de couverture de la cellule à laquelle il est rattaché, dite station de base source. Selon la topologie du réseau mobile, les signaux des cellules voisines se chevauchent, ce qui crée une zone d'intersection (voir Figure 3.1).

La station de base source décide ou non alors d'exécuter le handover. Elle prend sa décision en se basant sur le rapport des mesures reçu (niveau de signal, qualité de transmission, ...) [45, 46]. Si le handover est exécuté, alors les étapes suivantes sont réalisées :

(i) Initiation :

- La phase de préparation du handover commence par l'envoi d'une requête de handover de la station de base source vers une autre station de base, dite cible. Cette dernière est sélectionnée parmi les stations de base des cellules voisines. Elle est celle qui permet au terminal mobile une transmission avec

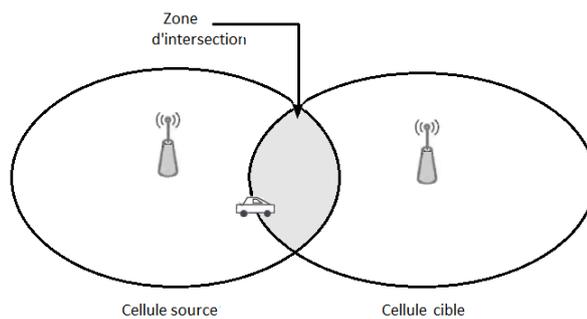


FIGURE 3.1 – Handover inter-eNodeB.

la meilleure qualité de signal. Nous détaillons par la suite la sélection d’une telle cellule. Rappelons que les stations de base peuvent communiquer entre elles via l’interface X2 qui existe dans l’architecture du réseau LTE.

- La station de base cible répond à la station de base source par un acquittement qui fournira les informations nécessaires pour l’établissement de cette nouvelle connexion via un nouveau canal radio.

(ii) Exécution :

- La station de base source transfère toutes les informations nécessaires au terminal mobile. Ensuite, elle arrête la transmission des données au terminal en interrompant sa connexion. Elle fait alors suivre les données qu’elle reçoit encore à la station de base cible.
- Le terminal mobile informe la station de base cible du succès du handover avec un message de confirmation. Jusqu’à cet instant la station de base cible enregistre les données reçues de la station de base source. Après avoir reçu le message de confirmation, elle commence à renvoyer les données enregistrées au terminal mobile.

(iii) Achèvement :

- La station de base cible initie le changement de chemin des données (tables de routage) en envoyant un “Handover Complete” aux passerelles du réseau (MME et S-GW). Les informations de localisation du terminal seront ensuite mises à jour au niveau des passerelles qui vont effectuer le changement de chemin. Ainsi, les données sont envoyées directement vers la station de base cible.
- Les passerelles MME/S-GW confirment le chemin par un message d’acquiescement. Dès que la station de base cible reçoit ce message, elle envoie une indication “Release Source” à la station de base source pour qu’elle libère définitivement les informations de connexion du terminal mobile. Cette dernière étape marque la fin du handover.

Quelques centaines de millisecondes suffisent au terminal mobile pour changer de cellule de connexion [45]. Si le handover est exécuté avec succès, la connexion du mobile est maintenue. Sinon, il échoue (par perte de signal, manque de ressources, ...)

et la connexion est interrompue. Notons que le processus de handover dans le réseau LTE est basé sur la politique *break-before-make*. C'est-à-dire que la connexion avec la station de base source est interrompue avant même (ou en même temps) d'établir la nouvelle connexion avec la station de base cible. Le handover est appelé dans ce cas *hard handover*. Dans certains réseaux des générations précédentes, notamment l'UMTS, la connexion avec une station de base source n'est interrompue que lorsque la connexion avec la station de base cible est établie. C'est la politique *make-before-break* et le handover est appelé dans ce cas *soft handover*. Cette politique était possible grâce au partage de ressources par code (CDMA et WCDMA). Ainsi le terminal mobile peut communiquer avec deux stations de base différentes via une même fréquence radio, ce qui n'est pas possible avec le réseau LTE. Rappelons que ce dernier est basé sur le partage de ressources OFDMA (voir Chapitre 2). Pour plus de détails voir [47, 48].

Notons que la requête de handover est envoyée dans certains cas par la station de base source vers la passerelle MME/S-GW qui la gère. Cette dernière transfère la requête à la station de base cible. Notons aussi que lorsqu'aucun lien direct (interface X2) n'existe pas entre la station source et la station cible, ces dernières communiquent via les interfaces S1 en passant par les passerelles MME/S-GW.

Plusieurs travaux de recherches ont montré que la gestion des handovers dans le réseau LTE présente des lacunes et nécessite une amélioration de ses performances, notamment la politique *break-before-make* [49][50]. En effet, le déploiement massif des petites cellules (pico, femto, ...) dans les réseaux actuels entraîne un temps de séjour des mobiles encore plus court [51, 52], ce qui rend le processus de handover plus fréquent. Ainsi, le processus risque d'échouer et peut entraîner une interruption de la connexion du mobile. De plus, un terminal mobile risque de se voir transféré plusieurs fois entre deux stations de base voisines dans un laps de temps très court. Cela arrive si les cellules de ces stations de base sont détectées avec la même qualité du signal de transmission et qu'elles demandent un équilibrage de la charge à chaque fois que ce terminal est connecté à leurs stations de base. Ce phénomène est appelé effet de *PingPong* [51]. Nous présentons dans les sections suivantes différents modèles qui visent à améliorer la gestion de la mobilité des utilisateurs dans le réseau LTE hétérogène.

3.3 Techniques de sélection de la cellule de rattachement

Quelle que soit la technologie du réseau, le terminal mobile réalise périodiquement des mesures de signal. Il mesure les signaux reçus et leur qualité même lorsqu'il n'est pas rattaché à une station base ; il est dans un état *libre* (dit *Idle* dans [53]). Lorsque le terminal mobile est déjà rattaché à une station de base, il est dans un état *connecté*. Il continue à réaliser les mesures de signal de transmission de la cellule de connexion. Selon le message de contrôle des ressources radio RRC (Radio Resource Control), le terminal mobile configure la prise de ces mesures et l'envoi périodique d'un rapport qui les regroupe. Il arrive que le terminal mobile envoie ce rapport si l'un des événements définis dans [46] est déclenché. Ces événements sont les suivants :

- **A1** : la qualité du signal de la station de base de connexion est meilleure qu'un seuil prédéfini.
- **A2** : la qualité du signal de la station de base de connexion est inférieure à un seuil prédéfini.
- **A3** : le signal de la station de base d'au moins une des cellules voisines est meilleur que le signal de la station de base de connexion.
- **A4** : la qualité du signal de la station de base d'au moins une des cellules voisines est meilleure que le seuil prédéfini qui lui correspond.
- **A5** : combinaison des conditions des événements A2 et A4.
- **A6** : la qualité du signal d'une des cellules voisines qui communique sur une autre fréquence que celle de la cellule de connexion du terminal mobile est meilleure.
- **B1** et **B2** : amélioration de la qualité du signal de la station de base d'une des cellules voisines adoptant une autre technologie d'accès radio (RAT : Radio Access Technology) que la station de base de connexion du terminal mobile.
- **C1** et **C2** : changement d'informations de l'état du canal utilisé pour la transmission (CSI-RS : Channel State Information - Reference Signal).

Toutes les mesures sont réalisées par la couche physique du terminal mobile et envoyées ensuite aux couches supérieures pour les traiter [54]. Ces mesures servent à informer la station de base, à laquelle le terminal est déjà rattaché, de la dégradation ou de l'amélioration de sa qualité de transmission par rapport à un seuil prédéfini. Elles servent également à donner un aperçu sur les cellules voisines de rattachement potentiel, en cas de décision de handover par la station de base de connexion. Ces mesures sont les suivantes :

- La puissance moyenne avec laquelle le signal référence d'une cellule est reçu, notée *RSRP* (Reference Signal Received Power). Elle est mesurée par élément de ressources sur une seule bande de fréquence (voir Section 2.4). La mesure RSRP peut être exprimée en Watt (W) ou dans une échelle logarithmique en décibels (dB). En général, elle est exprimée en termes de rapport entre la puissance mesurée et un millièème de watt (mW) noté dBm.
- L'indicateur de puissance du signal reçu, noté *RSSI* (Received Signal Strength Indicator). Le RSSI représente la puissance totale du signal reçu. Cela englobe le signal transmis, le bruit et les interférences sur toute la bande de fréquences (contrairement à RSRP qui est sur un élément de ressources).
- La qualité avec laquelle le signal référence d'une cellule est reçu, notée *RSRQ* (Reference Signal Received Quality). Elle est définie par le rapport entre le RSRP et le RSSI telle que :

$$RSRQ = \frac{N \times RSRP}{RSSI}$$

où N est le nombre de blocs de ressources qui correspond à la largeur bande utilisée par l'opérateur (voir Section 2.4). La valeur du RSRQ complète l'information donnée par la valeur du RSRP sur la qualité de la transmission. Elle fournit des informations supplémentaires quand le RSRP n'est pas suffisant pour décider d'un

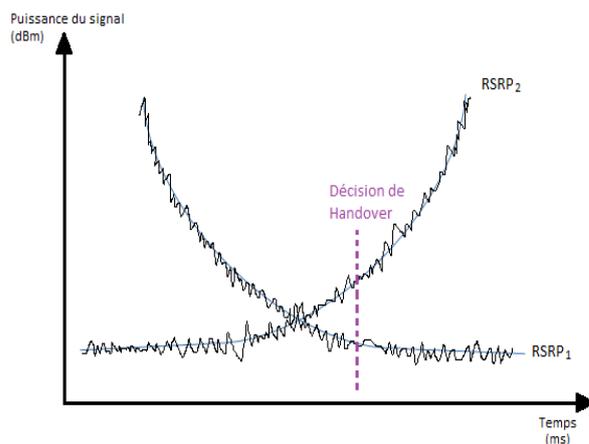


FIGURE 3.2 – Exemple de mesures de signal et décision de handover

handover ou pour la sélection d'une autre cellule vers laquelle le terminal peut être transféré.

- Le ratio du signal reçu sur le bruit et l'interférence, noté *SINR* (Signal to Interference plus Noise Ratio).

Les valeurs de RSRP, RSRQ et RSSI dépendent du réseau mobile, en particulier des ressources allouées par la station de base. La valeur du SINR dépend du terminal mobile.

Les mesures de RSRP et RSRQ sont complémentaires. Elles sont utilisées principalement pour trier les cellules de connexion potentielles selon la puissance et la qualité du signal de transmission. Ces mesures sont utilisées pour la re-sélection et la décision d'effectuer le handover. La figure 3.2 illustre la prise de décision de handover selon la mesure RSRP.

Le SINR est mesuré pour chaque bloc de ressources alloué. Cette mesure permet de configurer la réservation des ressources nécessaires pour la communication entre la station de base et le terminal mobile (scheduling). La quantité de blocs de ressources radio à allouer ainsi que le schéma de modulation et de codage sont définis selon cette mesure.

La procédure de handover a un impact important sur les performances du réseau. Dans le but de garantir une meilleure qualité de service, le terminal mobile est rattaché à la station de base dont la puissance du signal est la plus élevée (selon la valeur du RSRP). Après connexion, le terminal mobile continue à mesurer la qualité de sa transmission afin de changer de station de base si nécessaire, comme déjà mentionné. Selon [55], une priorité est attribuée aux cellules détectées sur la même fréquence et utilisant la même technologie d'accès que la cellule de connexion. Nous nous concentrons dans cette section sur la sélection de la cellule communiquant sur la même fréquence que la cellule de connexion.

Pour qu'une cellule soit détectée par un terminal mobile, certains critères définis par le réseau telle que la qualité minimale du signal doivent être satisfaits. Pour chaque cellule détectée C_i , un rang R_{n_i} lui est attribué selon les valeurs de RSRP et RSRQ.

Un rang R_s est attribué à la cellule de connexion du terminal mobile. Ainsi :

$$R_s = RSRP + Q_{Hyst} - Q_{Marge_{temp}}$$

$$R_{n_i} = RSRP_{C_i} - Q_{Marge} - Q_{Marge_{temp}}$$

Telle que Q_{Hyst} spécifie la valeur d'hystérésis pour les critères de classement, et Q_{Marge} est la marge de puissance du signal entre la cellule de connexion et la cellule voisine C_i . Le paramètre $Q_{Marge_{temp}}$ est la marge supplémentaire temporairement appliquée.

Selon ce classement, si une cellule voisine est mieux classée que la cellule de connexion alors elle est considérée comme une cellule cible et la décision de handover est prise [55].

Dans le but d'améliorer les performances du réseau et de mieux gérer les handovers des utilisateurs mobiles, des chercheurs s'intéressent à la sélection de la nouvelle cellule de connexion. La sélection de cette dernière revient à un problème d'affectation des mobiles. Ce problème est NP-difficile [56]. La plupart des travaux proposés (dans les articles académiques ou les rapports industriels) traitent des aspects limités du problème en proposant différentes heuristiques. Plus de détails sont présentés dans le chapitre 5. Dans la littérature, plusieurs stratégies sont proposées pour mieux gérer l'affectation des utilisateurs notamment lorsqu'ils se déplacent [57] [58] [56] [59].

Les auteurs dans [59, 58] proposent de se baser uniquement sur la mesure SINR pour sélectionner une cellule de rattachement dans un réseau mobile. Rappelons que cette mesure représente la qualité du canal de transmission par rapport aux interférences et au bruit. L'objectif dans [58] est d'éviter les problèmes d'interférences entre les cellules adjacentes dans un réseau 3G. Ainsi, la cellule sélectionnée est celle qui a la valeur maximale du SINR. Tandis que dans [59], l'objectif est la gestion des ressources des stations de base dans un réseau hétérogène. Les auteurs proposent un algorithme de prédiction de la quantité des ressources qu'une station de base va allouer au terminal mobile s'il se connecte à elle étant donnée la capacité disponible.

Le travail proposé dans [60] a pour but d'améliorer la gestion des handovers dans les réseaux mobiles. Les auteurs proposent un mécanisme de décision de la cellule de rattachement qui considère des contraintes de la QoS offerte par les cellules de rattachement potentielles. Ainsi, c'est le terminal mobile qui sélectionne la cellule à laquelle il veut se connecter selon la capacité disponible de cette dernière et la QoS dont il a besoin.

Étant donné un ensemble de stations de base S et un ensemble d'utilisateurs U présents dans leur zone de couverture, les auteurs dans [56] définissent une configuration par l'ensemble des affectations réalisées entre les deux ensembles S et U . Leur objectif est de trouver la meilleure configuration permettant de satisfaire simultanément toutes les demandes des utilisateurs de U avec un minimum de coût. Cela est possible en trouvant le bon dimensionnement du réseau mobile pour une telle configuration. Le coût d'une configuration est défini comme la capacité allouée par les stations de base pour satisfaire les demandes des utilisateurs. La solution qu'ils proposent est un algorithme de d'approximation qui permet de satisfaire k clients potentiels avec k stations de base déployées (chargées à 100%) pour chaque $k \leq \min\{m, n\}$ avec $m = |S|$ et $n = |U|$.

Avec le déploiement massif des petites cellules dans les réseaux de la 4G, la gestion des handovers est devenue un élément clé. Cependant, la taille des cellules entraîne des temps de résidence plus courts des mobiles rattachés aux petites cellules. La capacité limitée de ces dernières engendre également des changements de la cellule de rattachement dans le cadre d'un équilibrage de la charge. Afin de faire face à ces problèmes, certains travaux de recherche misent sur des approches permettant l'anticipation du processus de handover [61, 62]. Cela permet aux stations de base de mieux gérer leurs ressources et limiter les temps de latence causés par ces changements. Nous présentons dans la section suivante le principe de cette anticipation ainsi que quelques approches proposées dans la littérature.

3.4 Prédiction de la mobilité

Lorsqu'un utilisateur mobile se déplace, l'une des causes majeures d'interruption de sa connexion est le changement du point d'accès auquel il est rattaché dans le réseau mobile. Ce dernier doit prendre les mesures nécessaires afin de garantir si possible la continuité des services offerts au client mobile. Pour cela, le processus de handover doit limiter les délais et la perte des données. Anticiper ce processus offre au réseau une marge de temps qui lui permet de faire face à ces problèmes. Ainsi, prédire la mobilité des utilisateurs permet d'anticiper les handovers [61, 62]. L'objectif de la prédiction est de pouvoir appliquer la politique *Make-before-break* dans la gestion du handover. Rappelons que dans le réseau LTE, la politique du handover est *break-before-make*, ce qui consiste à interrompre la connexion d'un mobile avec la station de base à laquelle il est rattaché initialement avant l'établissement de la connexion avec la nouvelle station de base (voir Section 3.2). Nous présentons dans ce qui suit quelques mécanismes proposés dans la littérature afin de mieux prédire les déplacements des mobiles quels que soient leurs historiques.

3.4.1 Analyse de l'historique

La vie humaine est faite généralement de plusieurs actions quotidiennes qui se reproduisent fréquemment. De ce fait, plusieurs études se sont intéressées aux comportements des utilisateurs et à leurs déplacements. Dans [63], les auteurs ont prouvé que l'être humain suit de simples modèles reproductibles, notamment des déplacements quotidiens. En effet, la trajectoire des déplacements humains est caractérisée par un degré de régularité spatiale ainsi que temporelle très élevé. Les chercheurs se sont intéressés de plus à cette routine de vie des utilisateurs mobiles. Par conséquent, la plupart des travaux de prédiction sont basés essentiellement sur l'historique des déplacements de l'utilisateur mobile. Ainsi, une trace de mobilité est établie à partir des cellules visitées tout au long des déplacements. Elle contient les identifiants des stations de base auxquelles le terminal mobile a été rattaché comme présenté dans la figure 3.3. Dans cet exemple, la trace de mobilité de cet utilisateur, notée L , est la suivante :

$$L = 34, 33, 15, 4, 5, 4, 0, 1, 2, 1, 8, 9, 24$$

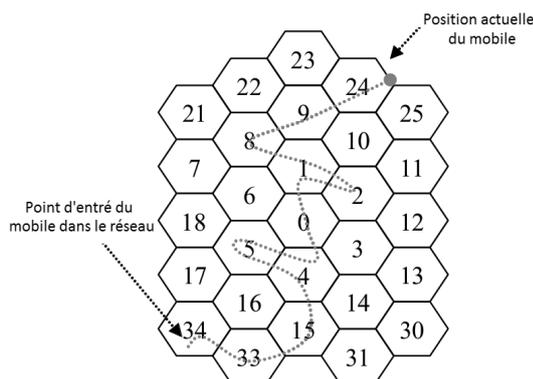


FIGURE 3.3 – Exemple de trace de mobilité

Le mobile est rattaché à la cellule courante 24. La première cellule à laquelle le mobile est rattaché dans le réseau (début de récolte d'informations) est la cellule 34.

La trace est mise à jour à chaque nouvelle connexion du terminal mobile à une station de base. Cette mise à jour consiste à insérer l'identifiant de cette station de base dans la liste de cette trace. Selon le modèle de prédiction adopté, la trace est analysée afin d'extraire les informations nécessaires à une prédiction juste de la mobilité de l'utilisateur.

Une trace de mobilité est dite riche en informations si sa taille est assez longue, c'est-à-dire par le nombre de cellules visitées. Dans le cas général, ce nombre dépend de la durée de la période de récolte de ces informations¹. Cependant, il est possible qu'une trace soit assez longue, mais les informations qu'elle contient ne soient pas pertinentes pour une prédiction juste. Cela arrive lorsqu'un mobile se déplace très souvent et qu'à chaque déplacement c'est une nouvelle cellule qu'il visite (le cas d'un touriste par exemple). En effet, la régularité des déplacements constitue le facteur clé pour une prédiction juste de la mobilité (lorsqu'elle est basée sur l'historique) [19]. Ainsi, la mobilité de chaque utilisateur est classifiée selon les informations disponibles dans sa trace de mobilité. La mobilité d'un utilisateur peut être comme suit :

- **Régulière** : le mobile emprunte un même chemin plusieurs fois. La même suite de cellules de rattachement réapparaît dans la trace de mobilité de l'utilisateur. Par exemple, le trajet quotidien pour un aller/retour au travail.
- **Irrégulière** : les mouvements du mobile sont aléatoires. Par exemple, les déplacements d'un mobile durant les week-ends ou dans un contexte de loisir.
- **Mixte** : c'est un mixte des deux cas précédents. Le mobile passe des phases de mobilité régulière à irrégulière et vice-versa.

Lorsqu'un utilisateur est caractérisé par une mobilité régulière, ses futurs déplacements sont donc faciles à prédire. Cependant, les effets de ping-pong (voir Section 3.2) peuvent fausser la prédiction. Autrement dit, si un mobile est transféré plusieurs fois, successivement, entre deux cellules C_1 et C_2 dans le cadre d'un équilibrage de la charge,

1. Il arrive qu'un mobile enrichisse sa trace de mobilité rapidement lorsqu'il fait beaucoup de déplacements durant une courte période.

alors à chaque déplacement vers la cellule C_1 le processus de prédiction anticipe son rattachement à la cellule C_2 , selon l'historique. D'une façon similaire lorsque le mobile est rattaché à la cellule C_2 , son rattachement à la cellule C_1 est prédit selon le résultat de la prédiction basée sur l'historique. Ainsi, quels que soient les déplacements de l'utilisateur, la prédiction de sa mobilité n'est pas tout à fait fiable. Nous présentons dans ce qui suit quelques modèles de prédiction de la mobilité des utilisateurs basés sur différents critères (historique, position géographique, ...).

3.4.2 Méthodes de prédiction de la mobilité

Différentes méthodes de prédiction de la mobilité des utilisateurs existent dans la littérature. Elles sont basées principalement sur l'historique des déplacements des mobiles [64, 65, 66]. En effet, analyser les cellules déjà visitées permet d'attribuer une probabilité de revisiter chacune d'entre elles en utilisant des modèles probabilistes, notamment des modèles Markoviens [19, 61, 67]. D'autres méthodes proposent une analyse globale des déplacements de tous les utilisateurs ainsi que l'architecture des rues afin de prédire les futurs déplacements de chacun d'entre eux [61, 62]. Nous présentons dans ce qui suit quelques méthodes adaptées aux réseaux mobiles hétérogènes.

Les performances d'une méthode de prédiction se résument dans le pourcentage des prédictions justes effectuées. La capacité d'effectuer une prédiction dans un délai court représente également un facteur clé dans la gestion de la mobilité des utilisateurs dans un réseau hétérogène de la 4G.

Étant donné la trace de mobilité $L = C_1, C_2, \dots, C_{n-1}, C_n$ d'un client mobile, la cellule à laquelle ce mobile est rattaché actuellement est la cellule C_n . L'objectif de la prédiction de la mobilité est de sélectionner une cellule C_{n+1} à laquelle le terminal mobile sera potentiellement rattaché après son prochain déplacement. Nous détaillons dans ce qui suit quelques modèles proposés dans la littérature.

3.4.2.1 Prédiction basée sur l'historique

Parmi les premières méthodes de prédiction proposées, ce modèle de prédiction est basé principalement sur la trace de mobilité de l'utilisateur. Selon la cellule de connexion actuelle du mobile ainsi que la régularité de ses mouvements, une cellule de la trace est sélectionnée comme le prochain point de connexion du mobile. Cette cellule est celle qui a été le plus visitée par le mobile à partir de la cellule courante et durant la période de récolte d'informations.

Cette méthode de prédiction est assez fiable lorsque la trace de mobilité de l'utilisateur est assez riche en informations, c'est-à-dire longue. Cependant, même si cela est vrai, si les déplacements du mobile ne sont pas réguliers, la probabilité de revisiter une séquence de cellules $C_i C_j$ tel que $C_i = C_n$ est plus faible. Ce modèle de prédiction est plus efficace lorsque les déplacements du l'utilisateur sont réguliers [65].

3.4.2.2 Prédiction basée sur un modèle Markovien

Cette méthode de prédiction vise à estimer la probabilité de se déplacer selon une certaine trajectoire. Ainsi, une probabilité est associée à chaque cellule voisine à laquelle le terminal mobile peut se rattacher. Selon la probabilité estimée, une cellule est sélectionnée comme le prochain point de connexion potentiel. Les chercheurs proposent différents modèles pour estimer la probabilité de rattachement à une cellule [68, 69, 70, 71, 72].

Les travaux présentés dans [72] visent à prédire les déplacements des utilisateurs selon le comportement global des autres mobiles. Cette approche est basée sur un apprentissage des différents déplacements possibles. Un vecteur de probabilités est associé à chaque déplacement possible. Ce vecteur est mis à jour par retour d'informations lorsqu'un mobile choisit de suivre une trajectoire précise. Cette approche de prédiction est adaptée aux utilisateurs ayant des déplacements réguliers et une vitesse limitée.

D'autres approches de prédiction de la mobilité des utilisateurs sont proposées dans [70, 71]. Les auteurs proposent de modéliser les déplacements des utilisateurs par un processus Markovien dans lequel les cellules de la trace représentent les états de la chaîne de Markov. En exploitant l'historique des déplacements, la probabilité de se connecter à une cellule C_{n+1} revient à analyser la fréquence des visites à cette cellule depuis la cellule courante C_n . Cette approche de prédiction est assez performante et facile à implémenter dans les réseaux hétérogènes [73]. Cependant, l'effet de ping-pong peut conduire à une mauvaise prédiction. Le manque d'informations dans la trace de la mobilité peut également réduire les performances d'une telle approche.

Dans [68, 62], les auteurs proposent de combiner deux approches de prédiction de la mobilité selon les informations disponibles dans la trace de la mobilité de l'utilisateur. Ils proposent de modéliser les déplacements du mobile par une chaîne de Markov du second ordre. Ce modèle est conçu pour faire face aux changements de comportement du mobile, c'est-à-dire les déplacements irréguliers ou mixtes.

Étant donné la cellule courante C_n , le modèle prédit, selon un choix probabiliste, la prochaine cellule \hat{C}_{n+1} à laquelle le mobile sera rattaché potentiellement. À l'inverse du modèle précédent, il analyse la fréquence des visites de la séquence de cellules $C_{n-1}C_n\hat{C}_{n+1}$ dans le passé. Si cette analyse ne permet pas de prédire une cellule alors la fréquence des visites de la séquence $C_n\hat{C}_{n+1}$ dans le passé est analysée. Or, il est possible que la cellule courante C_n soit visitée pour la 1^{ère} fois depuis le début de la collecte d'informations dans la trace. Ainsi, cette méthode de prédiction propose d'inclure la fréquence des visites des cellules voisines de la cellule courante C_n . Une cellule \hat{C}_{n+1} est sélectionnée parmi les cellules potentielles (voisines) comme la prochaine cellule de connexion du mobile, si la probabilité de transition estimée est maximale. Plus de détails sur l'estimation de la probabilité de transition sont présentés dans le chapitre 4.

Cette méthode de prédiction nécessite de connaître les cellules voisines de la cellule de connexion actuelle. Cette information peut être fournie soit par la connaissance de la topologie du réseau de l'opérateur, ou par l'analyse de l'intensité des signaux reçus.

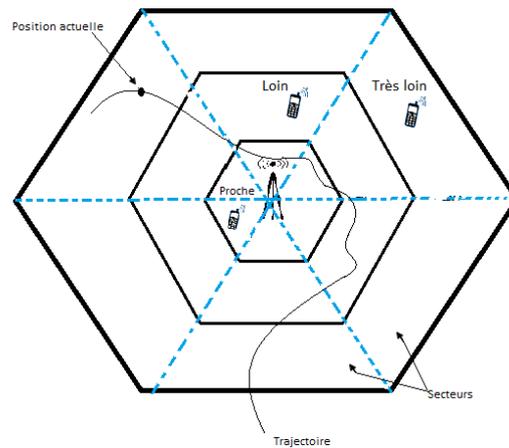


FIGURE 3.4 – Prédiction de la mobilité selon le secteur visité

Grâce à son temps de calcul, cette méthode de prédiction est adaptée au réseau LTE hétérogène. Elle permet également d'éviter les effets de ping-pong qui peuvent apparaître dans la trace de mobilité de l'utilisateur grâce à l'analyse approfondie de l'historique des déplacements (cellule de connexion précédente C_{n-1}).

Dans [69], les auteurs proposent d'adapter les modèles de prédiction basés sur les chaînes de Markov de premier et de second ordre à une architecture de réseau LTE. La passerelle S-GW prédit la prochaine cellule de rattachement en utilisant le modèle de prédiction basé sur les chaînes de Markov. Cela permet également d'analyser l'historique des déplacements de plusieurs utilisateurs. Si ce modèle n'aboutit pas (par manque d'informations dans les traces), alors la eNodeB prédit la cellule de rattachement suivante du mobile selon sa position dans la zone de couverture de la cellule courante. Cette zone est divisée en secteurs comme présenté dans la figure 3.4. Lorsque le mobile se déplace, la station de base analyse sa trajectoire et prédit la prochaine cellule de connexion qui correspond au dernier secteur visité.

D'autres travaux de recherche proposent également de se baser sur la localisation du mobile comme présenté dans [67]. Cela permet de mieux prédire les déplacements des mobiles notamment lorsqu'ils ne sont pas réguliers. Ce modèle de prédiction ne nécessite pas d'enregistrer toutes les cellules (ou tous les secteurs) parcourues par le mobile dans le passé. Il consiste à suivre la trajectoire des déplacements du mobile lorsqu'il est loin et très loin de la station de base. La position du mobile est vérifiée périodiquement. Selon ces informations, la direction du mobile peut être définie ainsi que sa vitesse.

3.4.2.3 Prédiction basée sur les profils

Des travaux de recherche proposent d'analyser l'historique des déplacements des utilisateurs et créer des profils qui permettent par la suite de prédire leurs chemins [61, 62]. Chaque chemin, souvent fréquenté, est associé à un profil local. Ainsi, chaque

utilisateur est caractérisé par un ensemble de profils locaux. Un profil global représente la séquence de cellules traversées par une majorité des clients du réseau. Chaque zone de couverture est caractérisée par un ensemble unique de profils globaux. Cet ensemble est partagé par tous les utilisateurs de cette zone de couverture. La liste des profils globaux est donc unique et propre à l'ensemble des utilisateurs d'une zone, tandis qu'une liste de profils locaux est propre à un utilisateur.

La définition des profils nécessite une connaissance exacte du réseau de couverture et l'analyse de tous les déplacements précédents des utilisateurs afin d'extraire tous les chemins possibles.

Cette méthode de prédiction est assez performante quels que soient les déplacements du mobile (réguliers, irréguliers ou mixtes). Cependant, elle nécessite plusieurs comparaisons entre différents profils. Ainsi, le temps nécessaire pour estimer le prochain déplacement du mobile est assez long comparé au temps de résidence dans la zone de couverture d'une petite cellule (pico ou femto).

3.5 Conclusion

Au cours de ces dernières décennies, la gestion de la mobilité des utilisateurs est devenue de plus en plus importante avec la diversité des services offerts et l'évolution des services de transport. Afin de garantir la continuité des services offerts, les opérateurs mobiles font face à plusieurs problèmes pour le bon fonctionnement de leur réseau cellulaire ainsi que la garantie de la QoS offerte à leurs clients.

Nous avons présenté dans ce chapitre le principe de gestion de la mobilité des utilisateurs dans les réseaux mobiles de la 4G, en particulier le réseau LTE hétérogène. D'après plusieurs statistiques et différents travaux de recherche, cette gestion présente différentes lacunes, notamment avec le déploiement massif des cellules de plus en plus petites (micro, pico, femto). Pour cela, nous proposons dans les chapitres suivants différentes approches qui visent à améliorer la gestion de la mobilité des clients tout en garantissant une bonne QoS à ces derniers. En effet, nous nous concentrons sur le contrôle de sélection de la cellule à laquelle le mobile devra être rattaché lorsque son terminal demande un transfert de connexion (handover). Nous sommes convaincus qu'un bon critère de sélection permettra d'améliorer les performances du réseau, en particulier en termes de coût énergétique, de dimensionnement, et de gestion des ressources.

Après sélection de la - meilleure - cellule de rattachement, la quantité de ressources que cette dernière peut allouer aux clients connectés à sa station de base doit être bien définie. Pour cela une approche de partage anticipé des ressources est proposée afin de mieux satisfaire les demandes des utilisateurs mobiles même lorsqu'ils sont gourmands en bande passante. Cette approche est présentée plus en détails dans le chapitre suivant.

Chapitre 4

Gestion prédictive des ressources

4.1 Introduction

L'architecture des réseaux mobiles actuels permet aux terminaux mobiles de se connecter grâce au réseau d'accès. Pour cela, les stations de base doivent garantir les ressources nécessaires pour tout échange de données. Des modules situés au niveau des stations de base sont dédiés à la fourniture d'accès et à la gestion des ressources radio.

Ce chapitre propose une gestion des ressources basée sur la prédiction de la mobilité des utilisateurs. Cette approche permet aux opérateurs mobiles de garantir la continuité des services proposés tout au long des déplacements de leurs clients. Elle considère un modèle techno-économique partiellement inspiré du système FON [30]. Ce modèle a pour but d'encourager les propriétaires des points d'accès à partager les ressources radio de leurs femtocellules avec d'autres utilisateurs mobiles [37].

Afin d'éviter les contraintes temps réel du modèle de partage des ressources, nous proposons d'anticiper les prochains déplacements des utilisateurs en utilisant le mécanisme de prédiction de la mobilité. En effet, connaître la prochaine cellule à visiter permet au réseau d'anticiper le processus de handover (voir Chapitre 3) et de préparer l'allocation des ressources aux utilisateurs.

Dans ce qui suit nous définissons le modèle de partage des ressources ainsi que le modèle de prédiction de la mobilité adoptés. Nous présenterons le modèle de gestion prédictive des ressources et les interactions entre les différents acteurs concernés. Afin d'évaluer les performances de l'approche proposée, plusieurs scénarios possibles sont considérés. Nous analysons la quantité de bande passante reçue ainsi que l'utilité obtenue dans chaque scénario.

4.2 Modèle de gestion des ressources par apprentissage

Dans le contexte de la gestion du partage d'accès aux femtocellules, un modèle techno-économique a été proposé dans [37] dans le cadre des deux projets : CELTIC

HOMESNET¹ (coord. Alcatel-Lucent Bell Labs, France) et AWARE² (coord. FTW, Vienna). Le réseau considéré est constitué des femtocellules dont les stations de base sont déployées chez le client de l'opérateur mobile (femto privée). Ainsi, l'objectif de ce modèle est d'inciter les clients à s'équiper d'une station de base femto chez eux et à partager leurs ressources radio avec les autres clients mobiles.

Dans ce modèle, les propriétaires des stations de base femto offrent l'accès à une partie de leurs ressources aux mobiles du réseau contre une certaine compensation (rémunération, droits d'accès aux ressources). La ressource d'une station de base est la bande passante dont elle dispose.

Le but de ce modèle est de proposer un mécanisme de partage d'accès aux ressources entre, d'une part les détenteurs des stations de base, et d'autre part les clients mobiles qui se déplacent dans la zone de couverture de cette station de base. Le modèle garantit à ces derniers un coût maîtrisé ainsi qu'une certaine équité. Nous présentons dans la suite les principales caractéristiques considérées dans notre travail. Le modèle de partage des ressources est défini en détail dans la thèse de Krichen [5].

4.2.1 Acteurs du modèle

L'approche de gestion des ressources proposé dans [37] est géré principalement par les clients de l'opérateur mobile. Nous distinguons deux types d'acteurs qui interagissent entre eux. D'une part, le propriétaire d'une station de base qui devient un *Client Fournisseur de Service* (CFS) en offrant l'accès à sa bande passante. D'autre part, le client mobile demande une quantité de bande passante qui permet de garantir la continuité de son service lors de ses déplacements. Il devient un *Client Demandeur de Service* (CDS). Dans ce qui suit, nous présentons les propriétés de chacun d'entre eux.

1) Client Fournisseur de Service

Un membre CFS est un client de l'opérateur mobile qui possède une station de base femto offrant une bonne couverture à l'intérieur comme à l'extérieur de son domicile.

En effet, un client fournisseur de service peut profiter du positionnement stratégique de sa station de base (par exemple à côté d'un restaurant ou d'une station de service) pour partager ses ressources contre une rémunération qu'il partagera par la suite avec son opérateur mobile.

L'utilisation des ressources d'un CFS est soit gratuite, soit payante. En effet, chaque CFS fixe le prix à payer pour pouvoir utiliser ses ressources, et quel que soit ce prix, il obtient lors de ses déplacements un accès gratuit aux ressources des autres points d'accès femto. Le propriétaire de la station de base femto peut aussi choisir de partager ses ressources sans contrepartie financière. Ainsi, il partage une partie de sa bande passante afin de pouvoir à son tour utiliser de la bande passante extérieure (couverture

1. CELTIC HOMESNET : Home Base Station : An Emerging Network Paradigm ; www.celticplus.eu/project-homesnet/

2. AWARE : Aggregation of WLAN Access Resources ; <https://www.celticplus.eu/project-aware/>

extérieure) des autres clients fournisseurs quand il en aura besoin. Un client fournisseur de service est caractérisé par :

- sa sensibilité au gain $\mu \in [0, 1]$,
- sa sensibilité à la QoS de sa propre connexion $1 - \mu$.

Plus μ est proche de 1, plus le CFS est sensible au gain financier. Sinon, il est considéré comme sensible à la QoS. Lorsqu'un client fournisseur partage une partie de sa bande passante, il peut décider pour ses propres besoins de la récupérer avec une probabilité dite *risque de préemption*.

Notons qu'un client fournisseur de service s'intéresse plus à la quantité de bande passante allouée qu'au nombre d'utilisateurs servis. Autrement dit, afin d'augmenter son gain, l'objectif d'un client fournisseur est de partager le plus de ressources possibles quel que soit le nombre de mobiles satisfaits.

2) Client Demandeur de Service

Un membre CDS est un client de l'opérateur mobile qui a besoin d'une bonne QoS à un prix raisonnable tout au long de son déplacement. Si le client demandeur possède une station de base femto chez lui et partage ses ressources, alors il accède à la bande passante des autres clients fournisseurs gratuitement. Sinon, il paye pour ce service.

Un client demandeur de service peut être sensible à la QoS reçue, ou au prix à payer pour pouvoir profiter de cette QoS. Ainsi, un CDS est caractérisé par :

- La sensibilité à la QoS, notée $\alpha \in [0, 1]$. Elle indique le degré de tolérance du CDS à la dégradation de sa QoS. En effet, quand le client fournisseur veut récupérer une partie de ses ressources, cela risque de dégrader la QoS des CDS auxquels cette partie de ressources a été allouée.
- La sensibilité au prix $1 - \alpha$. Cette valeur indique le degré de tolérance au coût de la connexion. Plus le CDS est sensible au prix, moins il est prêt à payer pour la connexion.

Plus α est proche de 1 plus le CDS est sensible à la QoS. Sinon, il est considéré comme sensible au prix à payer pour accéder aux ressources du fournisseur. Nous résumons les différents profils possibles d'un client fournisseur ou demandeur de service dans le tableau 4.1.

4.2.2 Modèle de jeu

Le partage d'accès à une femtocellule proposé dans [5] est basé sur la théorie des jeux. Il est considéré comme un jeu où les joueurs sont les *Clients Demandeurs de Service* et dont la capacité en ressources à partager est fixe. A chaque jeu, un seul client fournisseur de service est considéré. Dans les sections suivantes nous présentons les concepts de la théorie des jeux que nous utilisons, ainsi que le partage des ressources dans ce domaine. Pour plus de détails sur la théorie des jeux, voir [75] et [76].

Client	Rôle	Profil
Fournisseur (CFS)	Détenteur d'une petite station de base	Sensible au gain perçu ; $\mu \approx 1$
		Sensible à la QoS $\mu \approx 0$ (risque de préemption)
Demandeur (CDS)	Utilisateur mobile	Sensible à la QoS reçu ; $\alpha \approx 1$
		Sensible au prix à payer ; $\alpha \approx 0$

TABLE 4.1 – Différents profils d'un client demandeur ou fournisseur de service

4.2.2.1 Théorie des jeux

Un jeu est une situation de compétition entre des joueurs où chacun cherche à maximiser son gain étant donnée les stratégies de ses concurrents. La théorie des jeux étudie les stratégies des joueurs afin qu'ils atteignent leurs objectifs [76]. Un jeu est défini par :

- un ensemble de joueurs noté $J = \{j_1, j_2, \dots, j_N\}$, où N est le nombre total de joueurs,
- un ensemble de stratégies, noté $S_i = \{s_{i_1}, s_{i_2}, \dots, s_{i_{m_i}}\}$, que chaque joueur $i = 1, \dots, n$ peut adopter avec $|S_i| = m_i$,
- Étant donné un profil stratégique Π , tel que $\Pi = \{s_{1_{k_1}}, s_{2_{k_2}}, \dots, s_{N_{k_N}}\}$ dans lequel $s_{i_{k_i}} \in S_i$ est la stratégie choisie par le joueur i ($k_i \in \{1, \dots, m_i\}$), le gain du joueur i est défini par une fonction d'utilité notée $Util_i(\Pi)$.

Un vecteur de probabilités noté Vt_i est associé à l'ensemble des stratégies S_i tel que $Vt_i = (q(s_{i_1}), \dots, q(s_{i_{m_i}}))$. Chaque élément $q(s_{i_k})$ au vecteur tel que $k \in \{1, \dots, m_i\}$ et $m_i = |S_i|$, correspond à la probabilité que le joueur i choisisse de jouer la stratégie s_{i_k} . La somme des éléments de ce vecteur est égale à 1.

Dans le cas où la probabilité 1 est attribuée dans le vecteur Vt_i à une et unique stratégie s_i , alors cette dernière est dite *stratégie pure*. Autrement dit, une stratégie pure correspond à vecteur unitaire, sinon on parle de stratégies mixtes.

La théorie des jeux peut être appliquée dans différents secteurs concurrentiels (économie, politique ...). Un exemple (le dilemme du prisonnier) est présenté dans Annexe C. Lorsqu'aucun joueur ne regrette sa décision étant données les décisions de ses concurrent, on parle alors d'une situation d'équilibre. Ainsi, le résultat d'un jeu dépend conjointement des décisions (choix d'une stratégie) prises par chaque joueur.

- **Équilibre de Nash**

La notion d'équilibre a été définie par *John Forbes Nash*. La situation de non regret dans un jeu est dite *Équilibre de Nash*. Tous les joueurs sont satisfaits de leurs stratégies étant donnée la décision de chacun d'entre eux. En effet, chaque joueur a intérêt à ne pas changer sa stratégie puisqu'elle maximise son gain, compte tenu des décisions des autres joueurs [75]. Cet équilibre n'est pas forcément une solution optimale pour les

joueurs [76]. En effet, d'autres stratégies qui permettent aux joueurs un gain supérieur peuvent exister (voir l'exemple dans l'annexe C) [77].

4.2.2.2 Le jeu de partage des ressources

Considérons une partie du réseau constitué de P clients fournisseurs de service (CFS). Soit p l'un d'entre eux avec $p \in \{1, \dots, P\}$. La bande passante disponible (offerte au partage) du client fournisseur p est notée $B(p)$. Elle est divisée en deux parties : *garantie* et *non garantie*, notées $B_G(p)$ et $B_{NG}(p)$ respectivement.

La partie de bande passante dite garantie $B_G(p)$ est offerte au partage par le client fournisseur p . Ce dernier ne peut pas accéder à cette partie des ressources lorsqu'elle est allouée à un client demandeur. Cela est garanti même si le CFS p en a besoin pour sa propre connexion. De même, $B_{NG}(p)$ quantifie la partie de la bande passante, dite non garantie, à laquelle le CFS p peut accéder à tout moment pour ses propres besoins (même si elle est allouée à un client demandeur). Un risque de préemption (représenté par une probabilité) est associée à cette partie de la bande passante à laquelle le client fournisseur p a un accès prioritaire. Selon cette probabilité, le prix d'allocation d'une ressource non garantie est moins élevé que celui d'une ressource garantie. Plus le risque de préemption d'une ressource est élevé, moins cher sera son prix. Ainsi, la quantité de bande passante totale offerte au partage par un client fournisseur p est définie comme suit :

$$B(p) = B_G(p) + B_{NG}(p)$$

Dans ce qui suit G et NG font référence, respectivement, à une connexion garantie et une connexion non garantie. Chaque client demandeur de service doit bien formuler sa requête (ressources garanties ou non garanties) en fonction de ses besoins (prix et QoS). Pour cela, afin de partager la bande passante d'un client fournisseur de service p , les demandeurs constituent le jeu défini comme suit :

- Nous admettons N clients demandeurs de service (CDS) qui représentent les joueurs. Ils sont en concurrence pour avoir accès à une partie des ressources du fournisseur p .
- Un ensemble de stratégies possibles que chaque joueur peut adopter. Une stratégie est une demande élastique de bande passante (blocs de ressources) selon le profil du joueur α (Tableau 4.1) et la quantité de ressources dont il a besoin.
- Une fonction d'utilité calculée selon le profil (sensibilité à la QoS ou au prix) du client demandeur de service et les stratégies des autres joueurs.

Un joueur i , $i \in \{1, \dots, N\}$, envoie une requête de ressources à chaque client fournisseur potentiel p avec $p \in \{1, \dots, P\}$. Une requête quantifie la bande passante nécessaire pour chaque type de connexion (garantie ou non garantie) selon la stratégie qu'il adopte. Nous présentons dans ce qui suit la formulation des requêtes ainsi que la fonction de gain associée définis dans [37].

• **L'ensemble des stratégies :**

Chaque joueur i a besoin d'une quantité de bande passante que le fournisseur peut lui allouer afin de maintenir sa connexion ou profiter d'un des services de l'opérateur mobile (par exemple le téléchargement). A partir de cette quantité, le joueur i définit sa demande de ressources en garanties et non garanties. Une demande de ressources est donnée par un intervalle $[m_i^X, M_i^X]$ de quantité minimale m_i^X et de quantité maximale M_i^X en bande passante (on peut donc parler de demande élastique), avec $X \in \{G, NG\}$ définissant le type (garanti ou non garanti) de la ressource demandée.

Chacune des stratégies possibles $s_{i_k} \in S_i$ ($k = 1, \dots, |S_i|$) formulée pour accéder aux ressources du client fournisseur est définie par un couple de requêtes de ressources de type garantie et non garantie. Ainsi, si un CDS est servi, il se voit attribuer une quantité de bande passante comprise dans cet intervalle. Le choix des valeurs de ce dernier définit une stratégie dans l'ensemble S_i . En effet, une stratégie s_{i_k} peut être écrite comme suit :

$$s_{i_k} = \{[m_i^G, M_i^G], [m_i^{NG}, M_i^{NG}]\}$$

La quantité de bande passante de type non garantie qu'un joueur demande pourra être supérieure à la quantité qu'il demande de type garantie. En effet, étant donné le risque de préemption ρ associé à une ressource non garantie, le joueur doit prévoir une quantité de ressources supplémentaire afin d'augmenter le débit. Ainsi la quantité de ressources demandée de type non-garantie est déduite de la quantité demandée de type garantie comme suit :

$$\begin{cases} m_i^{NG} = m_i^G \times (1 + \rho) \\ M_i^{NG} = M_i^G \times (1 + \rho) \end{cases}$$

De cette façon chaque joueur définit son ensemble de stratégies possibles $S_i = \{s_{i_1}, \dots, s_{i_k}\}$. Chacun selon son profil (sensibilité au prix ou à la QoS), un client demandeur i définit chaque élément de cet ensemble ainsi que la taille de ses intervalles. De plus, en pratique, les besoins d'un client sont exprimés par une valeur réelle en termes de blocs de ressources selon le service qu'il utilise (navigation, vidéo,...). Dans ce qui suit nous présentons comment sont calculés les intervalles des stratégies possibles d'un joueur i selon sa sensibilité au prix et à la QoS.

— *CDS sensible au prix :*

Ce joueur demande une capacité de bande passante Cap à moindre coût ($\alpha < 0.5$). Cette capacité correspond à la quantité minimale qu'il demande en ressources garanties donc $m_i^G = Cap$ quelle que soit la stratégie adoptée. La quantité maximale de bande passante M_i^G est choisie selon la stratégie s_{i_k} avec $k \in \{1, \dots, |S_i|\}$. Pour cela, soit $Seuil_{Prix_i}^k$ un réel représentant le seuil de coût du joueur i pour la stratégie s_{i_k} . Ce seuil détermine la capacité maximale en bande passante (garantie ou non garantie) que le client est prêt à payer lorsqu'il adopte la stratégie s_{i_k} , c'est-à-dire qu'il permet d'exprimer la tolérance du client par rapport à la capacité demandée. Il est défini par :

$$\begin{cases} Seuil_{Prix_i}^1 = \alpha \times \Delta \\ Seuil_{Prix_i}^k = Seuil_{Prix_i}^{k-1} - \Delta/10 ; \quad k \in \{2, \dots, |S_i|\} \end{cases}$$

avec $\Delta = M_i^X - m_i^X$ et $X \in \{G, NG\}$. Le paramètre Δ représente la taille des intervalles de bande passante qu'un client demandeur (sensible au gain ou à la QoS) voudrait idéalement recevoir.

Ainsi, la quantité maximale qu'un joueur demande est définie par :

$$\begin{cases} M_{i_1}^X = m_{i_1}^X + Seuil_{Prix_i}^1 \\ M_{i_k}^X = M_{i_{k-1}}^X - \Delta/10 ; \quad k \in \{2, \dots, |S_i|\} ; \quad X \in \{G, NG\} \end{cases}$$

La valeur de $M_{i_1}^X$ représente la quantité maximale tolérée par le joueur i . En effet, elle dépend de sa sensibilité à la QoS ou au prix à payer (α). Le client demandeur de service refuserait toute connexion avec une quantité de ressources supérieure à $M_{i_1}^X$ proposée par le client fournisseur.

Exemple 1 : Soit un client demandeur de service i qui participe à un jeu et qui a besoin d'une capacité $Cap = 8$ en termes de blocs de ressources. Étant donné la taille des intervalles de bande passante que le client demandeur a choisi (Δ), il doit préparer 3 stratégies possibles. Le client demandeur étant sensible au prix ($\alpha = 0.1$), son ensemble des stratégies possibles S_i est présenté dans le Tableau 4.2. On considère que le risque de préemption associé aux ressources du client fournisseur est $\rho = 0.5$.

S_i	s_{i_1}	s_{i_2}	s_{i_3}
(m_i^G, M_i^G)	(8, 8)	(8, 12.9)	(8, 17.815)
(m_i^{NG}, M_i^{NG})	(12.4, 12.4)	(12.4, 20.01)	(12.4, 27.614)

TABLE 4.2 – Stratégies possibles d'un CDS sensible au prix

— *CDS sensible à la QoS :*

Ce joueur demande une capacité en bande passante Cap quel que soit le prix à payer ($\alpha > 0.5$). Cette capacité correspond à la quantité maximale qu'il demande en ressources garanties ($M_i^G = Cap$) quelle que soit la stratégie adoptée. Ainsi, la valeur de la quantité minimale en bande passante m_i^G varie selon la stratégie s_{i_k} avec $k \in \{1, \dots, |S_i|\}$. De la même façon qu'un demandeur sensible à la QoS, un seuil, noté $Seuil_{QoS_i}^k$, permet de déterminer cette quantité minimale de bande passante (en garantie ou non garantie). C'est le seuil de QoS du joueur i pour la stratégie s_{i_k} . Il est défini comme suit :

$$\begin{cases} \text{Seuil}_{QoS_i}^1 = (1 - \alpha) \times \Delta \\ \text{Seuil}_{QoS_i}^k = \text{Seuil}_{QoS_i}^{k-1} - \Delta/10; \quad k \in \{2, \dots, |S_i|\} \end{cases}$$

Comme précédemment, le paramètre Δ représente la taille des intervalles de bande passante qu'un client demandeur voudrait idéalement recevoir.

Ainsi, la quantité minimale que le joueur i demande est définie par :

$$\begin{cases} m_{i_1}^X = M_{i_1}^X - \text{Seuil}_{QoS_i}^1 \\ m_{i_k}^X = m_{i_{k-1}}^X - \Delta/10; \quad k \in \{2, \dots, |S_i|\}; X \in \{G, NG\} \end{cases}$$

Le client demandeur de service refuserait toute connexion avec une quantité de ressources inférieure à $m_{i_1}^G$ proposée par le client fournisseur (QoS insuffisante). C'est la quantité minimale tolérée qui dépend de la sensibilité α à la QoS du client demandeur.

Exemple 2 : Soit un client demandeur de service i qui participe à un jeu et qui a besoin d'une capacité $Cap = 8$ en termes de blocs de ressources. Étant donné la taille des intervalles de bande passante que le client demandeur a choisi (Δ), il doit préparer 3 stratégies possibles. Rappelons que les stratégies de demandes de ressources non garanties peuvent être calculées à partir de celles des demande de ressources garanties comme présentées plus haut.

Étant donné que le client demandeur est sensible au prix si $\alpha = 0.9$, son ensemble des stratégies possibles S_i est présenté dans le tableau 4.3. On suppose que le risque de préemption associé aux ressources du client fournisseur est $\rho = 0.5$. Les quantités tolérées en ressources garanties et non garanties sont $m_{i_1}^G = 6.41$ et $m_{i_1}^{NG} = 9.61$, respectivement.

S_i	s_{i_1}	s_{i_2}	s_{i_3}
$(m_{i_1}^G, M_{i_1}^G)$	(6.41, 8)	(7.20, 8)	(8, 8)
$(m_{i_1}^{NG}, M_{i_1}^{NG})$	(9.61, 12)	(10.08, 12)	(12, 12)

TABLE 4.3 – Stratégies possibles d'un CDS sensible à la QoS

- **Fonction d'utilité :** Chaque joueur envoie sa stratégie adoptée au fournisseur p .

L'ensemble des stratégies choisies par les N clients demandeurs de service forme un profil stratégique noté $\Pi = \{s_{1^{k_1}}^p, s_{2^{k_2}}^p, \dots, s_{N^{k_N}}^p\}$. La stratégie $s_{i^{k_i}}^p$ dans S_i est la stratégie choisie par le joueur i tel que $k_i \in \{1, \dots, |S_i|\}$. Selon la politique d'allocation du fournisseur p et le profil stratégique Π , une réponse $R_i = \langle X, bw_i \rangle$ est envoyée à chacun d'entre eux. Notons que la décision du client fournisseur p est déterministe pour chaque profil.

La réponse du fournisseur quantifie la partie de bande passante bw_i allouée à i , ainsi que son type de ressources $X \in \{G, NG\}$. La quantité de bande passante allouée bw_i

peut être nulle (0) si le joueur n'est pas servi. Sinon, elle est comprise dans l'intervalle de la stratégie adopté $s_{1k_i}^p$ et qui correspond au type X , c'est-à-dire que $bw_i \in [m_{i_{k_i}}^X, M_{i_{k_i}}^X]$ avec $k_i \in \{1, \dots, |S_i|\}$.

Afin qu'un CDS i évalue sa stratégie, une fonction d'utilité $Util_i(\Pi)$ est calculée. Étant donné la réponse $R_i = \langle X, bw_i \rangle$, lorsque le client demandeur i est sensible au prix ($\alpha < 0.5$), la fonction d'utilité est définie par :

$$Util_i(\Pi) = \frac{M_{i_1}^X - bw_i}{M_{i_1}^X - m_i^X} \quad (4.1)$$

$M_{i_1}^X$ est la quantité maximale tolérée de bande passante.

Lorsque le client demandeur i est sensible à la QoS ($\alpha > 0.5$), la fonction d'utilité est définie par :

$$Util_i(\Pi) = \frac{bw_i - m_{i_1}^x}{M_i^x - m_{i_1}^x} \quad (4.2)$$

$m_{i_1}^x$ est la quantité minimale tolérée de bande passante.

D'une façon générale, nous pouvons conclure que l'utilité d'un client demandeur de service dépend des facteurs suivants :

- sa stratégie, qui exprime la quantité de bande passante nécessaire. Cette stratégie, elle-même, dépend du profil du demandeur de service, du type de connexion et de son besoin en QoS,
- les stratégies de ses concurrents dans le jeu,
- les décisions du fournisseur, c'est-à-dire, le type et la quantité de bande passante allouée (garantie ou non garantie).

Afin d'aider les clients demandeurs de service à choisir la stratégie qui maximise leurs utilités, un processus d'apprentissage est considéré dans le modèle de partage des ressources. Dans ce qui suit, nous présentons le principe de cet algorithme.

4.2.2.3 Processus d'apprentissage

Afin d'avoir une vision sur les stratégies des joueurs concurrents et d'avoir une espérance de gain maximale, chaque joueur apprend la meilleure stratégie à jouer. Pour cela, le processus d'apprentissage consiste en plusieurs itérations. Comme présenté dans la figure 4.1, à chaque itération, le processus récompense la stratégie choisie en augmentant sa probabilité selon l'espérance de gain perçu. En effet, une stratégie choisie s_{i_k} tel que $k \in \{1, \dots, |S_i|\}$ est récompensée si et seulement si le gain correspondant est meilleur que celui du précédent tour. Apprendre le meilleur choix stratégique à jouer revient à exécuter les étapes décrites ci-dessous.

- A chaque client demandeur, est associé un vecteur, noté Vt_i , des probabilités $q(s_{i_k}, j)$ associées à chacune des stratégies possibles $s_{i_k} \in S_i$ du client demandeur i .

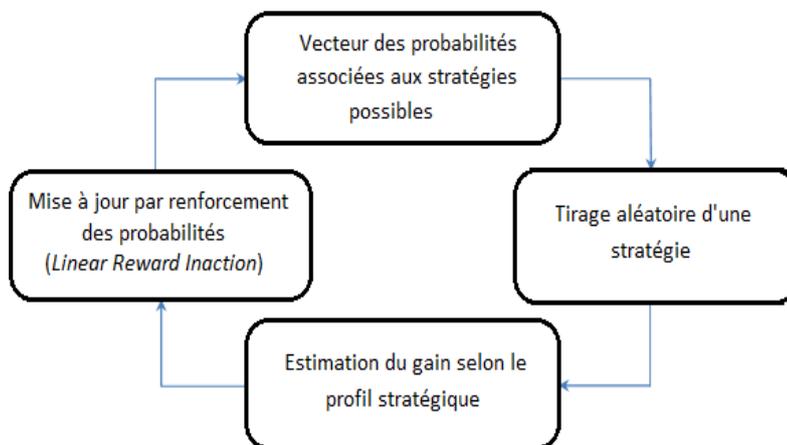


FIGURE 4.1 – Principe général de l'apprentissage par renforcement

Ainsi $Vt_i = (q(s_{i_1}, j), q(s_{i_2}, j), \dots, q(s_{i_K}, j))$ avec $K = |S_i|$ et j étant le tour d'apprentissage actuel. Chaque élément du vecteur représente la probabilité de jouer la stratégie correspondante. Notons que $\sum_{k=1}^K q(s_{i_k}, j) = 1$ (voir Section 4.2.2)

- A chaque tour d'apprentissage j , chacun des clients demandeurs sélectionne une stratégie aléatoire selon le vecteur des probabilités Vt_i . L'ensemble des stratégies choisies par les joueurs au tour j forment le profil stratégique Π_j .

- Chaque joueur i estime le gain perçu $Util_i(\Pi_j)$ étant donné le profil stratégique Π_j à ce tour.

- Selon le gain estimé et la valeur de la probabilité de la stratégie choisie, chaque client demandeur met à jour son vecteur Vt_i . Pour cela, les auteurs dans [37] utilisent l'algorithme de mise à jour par renforcement L_{R-I} (*Linear Reward Inaction*) [78] qui consiste à incrémenter la probabilité associée à la stratégie choisie lorsqu'elle améliore le gain par rapport à la stratégie sélectionnée durant le tour d'apprentissage précédent. Notons qu'à gains équivalents, plus la probabilité de la stratégie choisie est grande, moins elle augmente. Cependant, si le gain n'est pas amélioré par rapport au tour précédent, alors la probabilité de cette stratégie n'est pas décrétement. Soit $a_i(j) = s_{i_{k_i}}$ la stratégie sélectionnée par le joueur i au tour j , tel que $k_i \in \{1, \dots, |S_i|\}$. Selon l'utilité obtenue $Util_i(\Pi_j)$, le joueur i met à jour la probabilité $q(s_{i_{k_i}}, j)$ associée à la stratégie $s_{i_{k_i}}$ comme suit :

$$q(s_{i_{k_i}}, j + 1) = \begin{cases} q(s_{i_{k_i}}, j) - b \times Util_i(\Pi_j) \times q(s_{i_{k_i}}, j) & \text{si } a(j) \neq s_{i_{k_i}} \\ q(s_{i_{k_i}}, j) + b \times Util_i(\Pi_j) \times (1 - q(s_{i_{k_i}}, j)) & \text{si } a(j) = s_{i_{k_i}} \end{cases}$$

avec b un paramètre tel que $0 < b < 1$. Lorsque le vecteur d'un joueur est unitaire,

il est figé. Après un certain nombre de tours d'apprentissage noté nb_{Opt} , le processus d'apprentissage converge lorsque les vecteurs de probabilités de tous les joueurs sont unitaires.

La valeur du paramètre b permet de contrôler la vitesse avec laquelle le processus d'apprentissage converge. Plus le paramètre b est proche de 1, plus la mise à jour des probabilités est importante. Ainsi l'algorithme d'apprentissage converge plus rapidement vers une stratégie (nb_{Opt} petit). Plus le paramètre b est proche de 0, moins rapidement convergera l'algorithme d'apprentissage (nb_{Opt} grand). Cette valeur de b permet d'éviter que le processus d'apprentissage converge rapidement vers une des stratégies qui pourrait ensuite s'avérer mauvaise et s'y fige.

Le théorème de Verbeeck & Nowe montre que lorsque un équilibre de Nash pur existe, il existe une valeur suffisamment petite de b tel que si le processus d'apprentissage par renforcement converge, alors il converge vers l'équilibre de Nash. Les auteurs dans [5] ont prouvé l'existence d'un équilibre de Nash pur dans le jeu de partage des ressources. Ainsi, expérimentalement, ils ont montré que lorsque $b = 0.1$, le processus d'apprentissage converge toujours, dans tous les cas simulés, vers cet équilibre même si cela prend du temps (nb_{Opt} est grand). Dans ce cas, le gain obtenu pour chaque joueur est maximal étant données les stratégies des joueurs concurrents.

Exemple : Considérons les deux joueurs présentées dans l'exemple 1 et l'exemple 2 précédents. Les ensembles des stratégies possibles des deux joueurs 1 et 2 sont présentés dans les tableaux 4.2 et 4.3 respectivement. Durant le tour d'apprentissage j , les vecteurs de probabilités associées aux stratégies des deux joueurs 1 et 2 sont comme suit :

$$Vt_1 = (0.7, 0.01, 0.29)$$

$$Vt_2 = (0.27, 0.7, 0.03)$$

Au tour $j + 1$, le profil stratégique Π_{j+1} des joueurs est $\Pi_{j+1} = \{s_{1_1}, s_{2_2}\}$. Les joueurs estiment leurs utilités tel que $Util_1(\Pi_{j+1}) = 0.8$ et $Util_2(\Pi_{j+1}) = 0.87$. Ainsi, si $b = 0.1$, les vecteurs de probabilités associées aux stratégies des deux joueurs sont mis à jour comme suit :

$$Vt_1 = (0.724, 0.0092, 0.26)$$

$$Vt_2 = (0.25, 0.73, 0.02)$$

Les probabilités associées aux stratégies s_{1_1} et s_{2_2} sont incrémentées selon l'utilité obtenue. Afin de garantir que la somme des probabilité d'un vecteur égale à 1, les probabilités des autres stratégies sont mis à jour proportionnellement à leurs valeurs.

4.2.2.4 Attribution des Ressources

Rappelons que chaque client demandeur se voit attribuer une quantité de ressources bw_i de type $X \in \{G, NG\}$ selon sa stratégie jouée. En effet, pour un profil stratégique Π , une réponse $R_i = \langle X, bw_i \rangle$ est envoyée à chaque client demandeur. Notons qu'un

seul type de ressource (garantie ou non garantie) est alloué à un client demandeur de service ($X = G$ ou $X = NG$). L'objectif d'un client fournisseur $p \in P$ est de maximiser son gain en allouant le maximum de ressources. Dans ce but, la politique d'allocation que nous considérons dans ce travail consiste à satisfaire en priorité la quantité minimale requise m_i^X par les clients demandeurs les plus gourmands. En effet, cette politique d'allocation est basée sur le tri décroissant des demandes minimales en ressources garanties puis en ressources non garanties³. En adoptant cette politique d'allocation, le client fournisseur obtient un gain qui se rapproche de l'optimal [5]. Cela permet également de respecter les contraintes temps réel causées par le déploiement des petites stations de base (femtocellules).

Ainsi, le processus d'attribution des ressources consiste en deux phases. Durant la première phase, le client fournisseur se concentre seulement sur les demandes minimales des clients demandeurs. En effet, il décide des clients demandeurs à qui une quantité de bande passante est allouée. Les clients demandeurs sélectionnés sont ceux qui ont la demande minimale la plus élevée.

Durant la deuxième phase, la bande passante restante est allouée aux clients demandeurs sélectionnés durant la première phase. En effet, lorsque la quantité de bande passante totale $B(p)$ disponible est inférieure à la quantité minimale requise par d'autres clients demandeurs, le fournisseur p partage la bande passante restante entre les demandeurs déjà servis. Pour chaque type de connexion $X \in \{G, NG\}$, si la bande passante restante du fournisseur suffit pour servir le reste des besoins des demandeurs, alors ces derniers recevront le maximum de bande passante demandée M_i^X . Sinon, le fournisseur alloue la quantité restante équitablement, et proportionnellement à la valeur de leurs demandes, aux clients demandeurs qu'il a décidé de servir. Pour plus de détails, voir [5].

4.2.3 Mobilité des utilisateurs

Le modèle de gestion du partage des ressources, développé dans dans [37], a été conçu dans un contexte statique. En effet, la mobilité n'a pas été considérée. Dans un contexte dynamique, on observe le comportement d'un utilisateur mobile id tout au long de son déplacement. Il est considéré comme un client demandeur de service ayant des besoins fixes, en termes de ressources. A chaque demande de handover vers une cellule, cette dernière est considérée comme un nouveau client fournisseur de service et un nouveau jeu est entamé.

Dans un scénario de base, lorsqu'un utilisateur mobile se déplace dans le réseau, et rentre dans une zone d'intersection de deux cellules voisines, le signal de la cellule courante diminue et celui de certaines cellules voisines augmente. Ainsi, le processus de handover est lancé (voir Figure 4.2). A chaque demande de handover du mobile id , le réseau sélectionne une cellule f à laquelle ce mobile sera rattaché après son déplacement. Nous ne considérons dans ce travail que les cas où la cellule sélectionnée est une femtocellule f . La station de base de f alloue une quantité de bande passante au

3. Les auteurs dans [5] proposent deux politiques d'allocation afin de maximiser le gain du CFS. La première politique d'allocation est basée sur le tri décroissant. La deuxième est basée sur la solution exacte qui offre un gain optimal pour le client fournisseur. En effet, il choisit la configuration d'allocation qui optimise son gain.

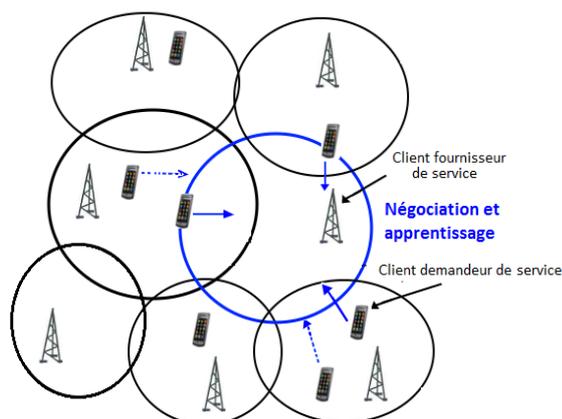


FIGURE 4.2 – La mobilité des utilisateurs et la gestion des ressources

mobile id selon le processus décrit dans la section 4.2.2.4 afin de garantir la continuité du service offert. Selon le modèle de partage de ressources, la femtocellule sélectionnée est considérée comme un client fournisseur de service.

Afin de modéliser les déplacements du mobile observé id , nous considérons la présence de mobiles concurrents souhaitant accéder aux ressources de la femtocellule f . Ainsi, chaque mobile (y compris id) exécute son processus d'apprentissage comme présenté dans la section 4.2.2.3. A la fin du processus d'apprentissage par renforcement, chaque mobile joue une stratégie aléatoire selon le dernier vecteur des probabilités. La station de base de la femtocellule f reçoit les demandes d'allocation de ressources des mobiles et leur alloue une quantité de bande passante. Le processus de handover est ainsi terminé et les mobiles sont connectés.

La vitesse des mobiles et la taille des femtocellules limitent le temps de passage par la zone d'intersection. Ainsi, la connexion à la nouvelle femtocellule doit donc être effective, c'est-à-dire qu'une quantité de bande passante doit être allouée lorsque le mobile quitte cette zone.

Comme présenté dans la section 4.2.2.3, pour que le processus d'apprentissage converge vers une stratégie, le mobile a besoin d'un nombre nb_{Opt} de tours d'apprentissage. Rappelons que ce nombre de tours permet (en moyenne) au processus d'apprentissage de converger vers l'utilité maximale et de sélectionner la stratégie correspondante (équilibre de Nash pure). Soit nb_{App} le nombre de tours d'apprentissage que le mobile a réalisé lorsqu'il était dans la zone d'intersection et avant sa connexion à la nouvelle femtocellule. Ainsi :

- **Si** $nb_{App} \leq nb_{Opt}$, le processus d'apprentissage converge vers l'équilibre. Le gain obtenu suite à la stratégie choisie est celui espéré.
- **Sinon**, le processus d'apprentissage n'a pas eu le temps de converger vers l'équilibre. Le mobile joue une stratégie aléatoire selon l'état du vecteur de probabilités Vt_{id} à la fin du processus. Dans ce cas, on ne peut rien constater de la stratégie choisie, notamment si elle permet de se rapprocher de l'équilibre si le mobile avait plus de temps pour apprendre.

Le modèle permet de garantir un accès équitable⁴ aux stations de base des femtocellules entre les clients mobiles demandeurs d'accès. En effet, le jeu de partage de ressources suppose une synchronisation entre les utilisateurs en compétition. En revanche, cette hypothèse est loin de la réalité puisque les utilisateurs mobiles ne se déplacent pas d'une façon synchrone entre eux. Ce mécanisme nécessite potentiellement un temps de calcul lent afin que le processus d'apprentissage converge après un nombre de tours $nb_{App} \leq nb_{Opt}$. Il peut nécessiter également un nombre important d'échanges entre le mobile et la station de base de couverture. Tout cela ne peut être compatible avec les vitesses de déplacement des utilisateurs dans une couverture cellulaire femto.

4.3 Gestion prédictive du partage des ressources

Dans le but de satisfaire les contraintes temps réel en considérant la mobilité du modèle de partage des ressources présenté ci-dessus, nous proposons dans cette section d'intégrer un algorithme de gestion prédictive de la mobilité des utilisateurs. Cet algorithme est basé sur un modèle Markovien qui permet d'anticiper le jeu de partage des ressources. En effet, en utilisant un algorithme de prédiction de la mobilité, chaque mobile connaît la cellule de rattachement suivante à laquelle il doit préparer une demande d'allocation de ressources. Ainsi, le processus d'apprentissage des mobiles peut également être anticipé afin de préparer le jeu avec les femtocellules de rattachement après le déplacement des mobiles [79].

Nous présentons dans ce qui suit l'algorithme de prédiction de la mobilité que nous considérons dans ce travail. Nous présentons ensuite l'approche de gestion prédictive du partage des ressources ainsi que l'algorithme correspondant.

4.3.1 Modèle Markovien pour la prédiction de la mobilité

De nombreuses méthodes de prédiction de la mobilité sont basées sur les processus de Markov[80]. Elles exploitent l'historique de mobilité des utilisateurs. Dans ce travail et dans le contexte d'une architecture LTE, on se base sur le travail proposé dans [68] et [69]. La suite des mouvements de chaque mobile est stockée sous forme d'une *trace de mobilité*. Celle-ci est mise à jour à chaque nouveau déplacement.

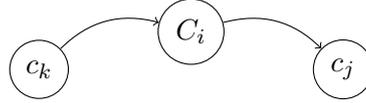
Soit $L = C_1C_2C_3...C_{n-1}C_n$ la trace de mobilité d'un utilisateur, telle que $C_i, i = 1, \dots, n$, est la cellule de connexion lors du $i^{\text{ème}}$ déplacement.

Le principe de la prédiction présenté dans [68] est de modéliser les déplacements du mobile par un processus de Markov à temps continu, défini sur un espace d'état discret. Dans ce qui suit, on considère la chaîne de Markov en temps discret (chaîne incluse) tel que chaque état de la chaîne correspond à une cellule du réseau. Chaque demande de handover induit un changement d'état dans la chaîne de Markov. Ainsi, prédire un déplacement revient à estimer la probabilité de transition $P(W_{n+1} = C_n\hat{C}_{n+1}/W_n = C_{n-1}C_n)$ de la cellule courante C_n vers \hat{C}_{n+1} , la cellule qui sera potentiellement visitée étant donnée la cellule précédemment visitée C_{n-1} .

4. Aucun joueur ne regrette sa stratégie jouée, si c'est un équilibre de Nash.

Soit $\Gamma(C)$ l'ensemble des cellules voisines de la cellule C . A chaque cellule de la trace C_i , $i \in \{1, \dots, n\}$, est associé un triplet (M, N, r) qui est mis à jour après chaque handover, tel que :

- $M(c_k, C_i, c_j)$ est le nombre de transitions du mobile, dans le passé, de la cellule C_i vers une de ses cellules voisines $c_j \in \Gamma(C_i)$ sachant qu'il était dans $c_k \in \Gamma(C_i)$ avant d'aller à C_i . Ce nombre est calculé pour chaque paire de cellules c_j et c_k dans $\Gamma(C_i)$ avec $j \neq k$.



- $N(c_k, C_i)$ est le nombre de transitions du mobile, dans le passé, de chaque cellule c_k , avec $c_k \in \Gamma(C_i)$, vers la cellule C_i .
- $r(C_i)$ représente le temps de résidence moyen de l'utilisateur dans la cellule C_i . Si $r(C_i)$ est inférieur à un certain seuil alors la transition vers/depuis la cellule C_i n'est qu'un effet de *pingpong* [68].

Selon les informations qu'une trace de mobilité peut contenir (voir section 3.4.1, page 32), les déplacements du mobile sont modélisés par un processus de Markov du second ou du premier ordre. Lorsque le processus du second ordre est considéré, la prédiction de l'état futur dépend non seulement de la cellule courante, mais aussi de la cellule précédente. Lorsque le processus du premier ordre est considéré, la prédiction du prochain état dépend uniquement de la cellule courante.

Nous considérons que la trace de mobilité de l'utilisateur peut contenir assez, pas assez ou pas d'informations du tout concernant la cellule courante et ses cellules voisines. En effet, trois cas sont possibles :

- (i) La trace de mobilité de l'utilisateur contient assez d'informations lorsque $M(C_{n-1}, C_n, \hat{C}_{n+1}) \neq 0$. C'est-à-dire que des transitions entre les cellules C_{n-1} , C_n et \hat{C}_{n+1} ont déjà été réalisées dans le passé. Les déplacements du mobile sont modélisés dans ce cas par un processus de Markov en du second ordre. La probabilité de transition de la cellule C_n vers la cellule \hat{C}_{n+1} est calculée comme suit :

$$P(W_{n+1} = C_n \hat{C}_{n+1} / W_n = C_{n-1} C_n) = \frac{M(C_{n-1}, C_n, \hat{C}_{n+1})}{N(C_{n-1}, C_n)} \quad (4.3)$$

- (ii) La trace de mobilité ne contient pas assez (ou aucune) d'informations sur les cellules précédemment visitées, c'est-à-dire que $M(C_{n-1}, C_n, \hat{C}_{n+1}) = 0$. Les déplacements du mobile sont modélisés alors par un processus de Markov du premier ordre. Étant donné $Z(C_n)$ le nombre de fois que la cellule C_n a été visitée, la probabilité de transition est donnée par :

$$P(W_{n+1} = C_n \hat{C}_{n+1} / W_n = C_{n-1} C_n) = \frac{N(C_n, \hat{C}_{n+1})}{Z(C_n)} \quad (4.4)$$

- (iii) La cellule courante est visitée pour la première fois ($Z(C_n) = 0$). L'algorithme de prédiction considère dans ce cas la fréquence des visites des cellules voisines de C_n , qu'on note $H(C_n)$, et telle que :

$$H(C_n) = \sum_{j=1}^{|\Gamma(C_n)|} Z(c_j)$$

Ainsi, la probabilité de transition de C_n vers une cellule potentielle \hat{C}_{n+1} est donnée par :

$$P(W_{n+1} = C_n \hat{C}_{n+1} / W_n = C_{n-1} C_n) = \frac{Z(\hat{C}_n + 1)}{H(C_n)} \quad (4.5)$$

Lorsqu'un utilisateur se déplace, le processus de prédiction est considéré a chaque nouvelle visite d'une cellule C_n du réseau. Il calcule la probabilité de transition de la cellule courante C_n vers chacune des cellules voisines C_j avec $C_j \in \Gamma(C_n)$, c'est-à-dire :

$$P(W_{n+1} = C_n \hat{C}_{n+1} / W_n = C_{n-1} C_n) |_{\hat{C}_{n+1}=C_j} ; C_j \in \Gamma(C_n)$$

Le résultat de la prédiction est un sous-ensemble des cellules voisines $\Gamma'(C_n) \subset \Gamma(C_n)$. Une cellule C_j est dans $\Gamma'(C_n)$ si et seulement si la probabilité de transition $P(W_{n+1} = C_n \hat{C}_{n+1} / W_n = C_{n-1} C_n) |_{\hat{C}_{n+1}=C_j}$ est supérieure à un seuil prédéfini.

Nous considérons dans ce travail que le réseau décide de la prochaine cellule qui sera potentiellement visitée par l'utilisateur parmi les cellules de $\Gamma'(C_n)$. Cette cellule est celle qui maximise la probabilité de transition depuis C_n vers sa station de base.

4.3.2 Partage anticipé des ressources

L'anticipation de la prochaine cellule à visiter offre plus de temps aux utilisateurs mobiles pour négocier avec les femtocellules détectées. Cela permet une synchronisation entre les processus d'apprentissage des mobiles concurrents et leur permet également assez de temps pour converger vers une stratégie à jouer.

En se référant au modèle de jeu présenté dans la section 4.2, les acteurs qui interagissent principalement dans cette approche sont d'une part les utilisateurs mobiles en tant que clients demandeurs de service, et d'autre part la station de base de la femtocellule à laquelle les mobiles sont rattachés en tant que client fournisseur de service. Nous présentons dans ce qui suit les paramètres caractérisant chaque acteur, avant d'introduire l'approche de gestion prédictive du partage des ressources que nous proposons dans ce chapitre.

- **Utilisateur mobile** : C'est un client de l'opérateur mobile qui demande des ressources pendant ses déplacements dans le réseau de couverture. Soit u cet utilisateur. Sachant que u est un client demandeur de service, il hérite du profil caractérisant cet

acteur dans le modèle de base de gestion de partage des ressources, c'est-à-dire sa sensibilité à la QoS offerte ou au prix à payer (voir Section 4.2).

Nous considérons chaque nouveau déplacement du mobile u qui nécessite un handover comme une nouvelle étape. En effet, à chaque fois que le mobile u entre dans la zone de couverture d'une cellule, une nouvelle étape t est considérée. Ainsi, à chaque étape t , le mobile u est caractérisé par :

- Une cellule de rattachement notée $Cell(u, t)$. Elle lui fournit les ressources qu'il demande.
- Une capacité requise $Cap_{req}(u, t)$, en termes de bande passante⁵. Par hypothèse, la capacité requise est constante pendant tous les déplacements du mobile u .
- Une stratégie $s_u(t)$ joué par le mobile u à l'étape t . Rappelons qu'une stratégie est un couple d'intervalles de quantité minimale et maximale de ressources garantie et non garantie demandées tel que $s_u(t) = \{(m_u^G, M_u^G), (m_u^{NG}, M_u^{NG})\}$ (voir Section 4.2.2.2).
- Une capacité allouée $Cap_{all}(u, t)$. Cette capacité peut être garantie ou non garantie, selon la valeur de X tel que $X \in \{G, NG\}$. Ce dernier dépend de la réponse de la cellule de rattachement. Selon la quantité de ressources allouées, la requête de l'utilisateur u est dite :
 - i. Totalement satisfaite si $\mathbf{Cap}_{all}(\mathbf{u}, \mathbf{t}) = \mathbf{M}_{\mathbf{u}}^x$,
 - ii. Partiellement satisfaite si $\mathbf{m}_{\mathbf{u}}^x \leq \mathbf{Cap}_{all}(\mathbf{u}, \mathbf{t}) < \mathbf{M}_{\mathbf{u}}^x$,
 - iii. Pas satisfaite si $\mathbf{Cap}_{all}(\mathbf{u}, \mathbf{t}) = \mathbf{0}$.
- L'utilité $Util_u(t)$ que l'utilisateur u obtient en jouant sa stratégie $s_u(t)$ et en considérant les stratégies adoptées par les utilisateurs concurrents. Selon l'utilité obtenue et qui dépend de la quantité de ressources allouées, le mobile u est dit :
 - i. Totalement satisfait si $\mathbf{Util}_{\mathbf{u}}(\mathbf{t}) = \mathbf{1}$
 - ii. Partiellement satisfait si $\mathbf{0} < \mathbf{Util}_{\mathbf{u}}(\mathbf{t}) < \mathbf{1}$
 - iii. Pas satisfait si $\mathbf{Util}_{\mathbf{u}}(\mathbf{t}) = \mathbf{0}$
- Une trace de mobilité L qui contient les identifiants de toutes les cellules auxquelles u a été rattaché durant les étapes précédentes.

• **Femtocellule :**

Chaque station de base d'une femtocellule f_i est considéré comme un client fournisseur de service. Elle hérite de son profil dans le modèle de base de gestion de partage des ressources. La femtocellule f_i est également caractérisée par :

5. Si le mobile u est sensible au prix alors $Cap_{req}(u, t) = m_u^G$, c'est-à-dire la quantité minimale demandée. Si le mobile u est sensible à la QoS alors $Cap_{req}(u, t) = M_u^G$, c'est-à-dire la quantité maximale demandée (voir Section 4.2.2)

- Une capacité disponible $Cap(f_i)$, en termes de ressources, telle que $Cap(f_i) = Cap_G(f_i) + Cap_{NG}(f_i)$, avec $Cap_G(f_i)$ la quantité de ressources garanties et $Cap_{NG}(f_i)$ la quantité de ressources non garanties (G et NG).
- Un risque de préemption ρ qui représente la probabilité qu'une connexion de type non-garanti soit interrompue par la station de base (le fournisseur du service) pour ses propres besoins.
- Un nombre maximum de mobiles que la femtocellule f_i peut gérer simultanément. Il est noté $nb_{max}(f_i)$.
- Un graphe de voisinage $V(f_i) = (E, A)$, qui modélise la topologie du réseau. Chaque sommet e_j dans l'ensemble des sommets E est une cellule du réseau. Une arête $[e_j, e_k]$ dans l'ensemble des arêtes A modélise une intersection entre les cellules qui correspondent à e_j et e_k , avec $j, k \in [1, R]$, R étant la taille du graphe.
- Une politique de partage des ressources qui définit la manière dont les ressources sont attribuées aux utilisateurs mobiles. Nous considérons que toutes les femtocellules attribuent leurs ressources selon un tri décroissant des demandes minimales (voir Section 4.2.2.4).

A chaque étape t , nous définissons le *contexte* d'une cellule f_i qui relie sa capacité disponible $Cap(f_i)$ et l'ensemble des mobiles connectés à elle, soit $\{u/Cell(u, t) = f_i\}$.

4.3.2.1 Algorithme de partage anticipé des ressources

A l'étape t , le mobile u est rattaché à la femtocellule $Cell(u, t) = f_i$. Son terminal mobile exécute le processus de gestion prédictive des ressources afin de prédire la prochaine cellule de rattachement et anticiper le contexte de cette dernière. Ce processus est présenté par l'algorithme 1. Nous présentons dans ce qui suit le fonctionnement de cet algorithme ainsi que les différents scénarios considérés.

Étant dans la zone de couverture de la cellule f_i (zone 1 dans la figure 4.3) le terminal mobile calcule la probabilité de transition de cette cellule vers chacune des cellules voisines f_l dans le graphe de voisinage $V(f_i)$ en utilisant l'algorithme de prédiction de la mobilité.

Le terminal du mobile u communique le résultat de sa prédiction à la station de base qui le couvre. Si plusieurs cellules sont prédites, la cellule courante décide de la prochaine cellule de rattachement du mobile u notée $Pred(u, t)$. Soit f_j cette cellule telle que $Pred(u, t) = f_j$. Dans notre cas, la cellule prédite est celle qui maximise la probabilité de transition. Avec l'aide de la station de base de f_i , le mobile u initialise son apprentissage et sa négociation avec la station de base de la cellule prédite f_j . Cela permet au mobile u de préparer le jeu de partage de ressources contre des mobiles concurrents qui essayent d'accéder aux mêmes ressources.

Après un certain nombre de tours d'apprentissage $nb_{App}(t)$ ⁶ durant l'étape t , le mo-

6. La valeur de nb_{App} est fixée expérimentalement suffisamment grande pour permettre au processus d'apprentissage de converger vers une stratégie

Algorithme 1 Gestion prédictive de Handover

Procédure (Trace de mobilité L_u , Graphe de voisinage $V(f_i)$)

loop :
 Sélection de $Pred(u, t)$ selon les probabilités de transition
 Formuler la requête $s_u(t + 1)$
 $t \leftarrow t + 1$ /* déplacement du mobile*/
 $L_u \leftarrow L_u + Cell(u, t)$ /* mettre à jour la trace de mobilité*/
 Réception de $R = \langle X, bw_u \rangle$
Si $bw_u = 0$ **alors**
 u n'est pas servi
Sinon
 Si $Util_u(s_u) = 1$ **alors**
 u est totalement satisfait
 Sinon
 u est partiellement satisfait
 Fin Si
Fin Si
 goto loop.
Fin Procédure

bile u choisit aléatoirement, selon le vecteur des probabilités, sa stratégie notée $s_u^*(t + 1)$ à jouer après son déplacement (étape $t + 1$).

Lorsque le mobile u se déplace une nouvelle étape $t + 1$ est considérée. Il demande un handover vers la nouvelle cellule $Cell(u, t + 1)$. Deux scénarios sont possibles dans ce cas :

- a) **Prédiction fautive :** Le mobile n'est pas dans la zone de couverture de la cellule prédite, c'est-à-dire que $Cell(u, t + 1) \neq Pred(u, t)$ et $Cell(u, t + 1) = f_k$. Par conséquent, le mobile u se retrouve rattaché à une cellule pour laquelle la stratégie choisie n'est pas adaptée a priori à ce jeu. De plus, le temps de traversé de la zone d'intersection entre les cellules f_i et f_k ne permet pas au processus d'apprentissage du jeu de partage des ressources de la cellule f_k de converger.

Le mobile u peut, dans ce cas, jouer la stratégie qu'il a préparé pour la cellule prédite f_j afin de demander des ressources de la cellule de rattachement actuelle f_k ($f_j \neq f_k$), c'est-à-dire $s_u^*(t + 1)$. Rappelons que cette stratégie dépend des caractéristiques et du profil de la station de base de la femtocellule prédite f_j (capacité disponible, risque de préemption, ...).

- b) **Prédiction juste :** L'utilisateur mobile est rattaché à la cellule prédite, c'est-à-dire que $Cell(u, t + 1) = Pred(u, t)$. Il joue la stratégie $s_u^*(t + 1)$ déjà préparée.

La station de base de la cellule $Cell(u, t + 1)$ alloue des ressources aux mobiles rattachés à elle, chacun selon la stratégie anticipée.

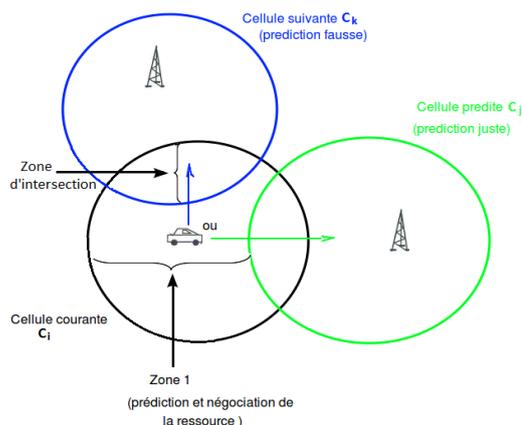


FIGURE 4.3 – Gestion prédictive de partage des ressources

L’algorithme de gestion prédictive des ressources présenté ci-dessus aide les mobiles à anticiper la stratégie de demande de ressources afin de maximiser leurs utilités. Cependant, cette dernière dépend des mobiles concurrents connectés à la même cellule et leurs stratégies de demande de ressources. De plus, la stratégie de chaque mobile dépend du résultat de sa prédiction et du jeu qu’il a anticipé.

Rappelons que l’utilité d’un mobile dépend également de la réponse du client fournisseur de service, c’est-à-dire la femtocellule, et de sa politique d’attribution des ressources aux mobiles connectés à sa station de base (voir Section 4.2.2). Pour cela, dans ce qui suit, nous considérons dans un premier temps qu’une femtocellule attribue ses ressources aux mobiles connectés à sa station de base en les traitant d’une façon similaire, c’est-à-dire indépendamment du résultat de leur prédictions. Nous introduisons par la suite une priorité aux mobiles qui ont bien prédit leurs déplacements. En effet, ces mobiles auront à leur disposition toute la capacité disponible de la cellule de rattachement afin de satisfaire leurs demandes. Les mobiles qui se retrouvent rattachés à une cellule non prédite se partageront la capacité restante des ressources.

4.3.2.2 Attribution des ressources

Dans une approche fondamentale, après prédiction et déplacement, le mobile u est rattaché à l’étape $t + 1$ à une cellule qui lui alloue une quantité de bande passante selon sa disponibilité. Le mobile u est connecté à cette cellule si sa station de base lui alloue une quantité de ressource $Cap_{all} \neq 0$ de type $X \in \{G, NG\}$. Cette quantité de ressources est comprise dans l’intervalle $[m_u^X, M_u^X]$ de la stratégie jouée par le mobile u lors du jeu de partage de ressources selon son profil et les demandes de ses concurrents (voir Section 4.2.2.4).

La satisfaction d’un mobile u dépend principalement du résultat de la prédiction de sa mobilité. Si le mobile u est rattaché à une cellule non prédite alors la capacité disponible de cette dernière peut ne pas correspondre à la capacité disponible de la cellule prédite. Sa satisfaction dépend également des mobiles concurrents présents lors de

l'apprentissage anticipé du jeu de partage des ressources ainsi que de ceux qui participent réellement à ce jeu (lors de l'attribution des ressources). Notons que les mobiles qui participent au jeu de partage des ressources sont ceux qui sont effectivement rattachés à la cellule au même moment que le mobile u . Autrement dit, la satisfaction d'un mobile u dépend des paramètres suivants :

- **Stratégies des mobiles concurrents** : grâce au processus d'apprentissage, le mobile u apprend à formuler sa requête en tenant compte des stratégies des mobiles concurrents. Dans le modèle de jeu, l'utilité du mobile u dépend des stratégies des autres joueurs (voir Section 4.2.2).
- **Résultats de la prédiction des mobiles concurrents** : Si l'un des concurrents prédit mal son déplacement, alors il risque de ne pas participer au jeu (voir Figure 4.4). Cela va perturber l'utilité que chaque mobile espérait recevoir en jouant sa stratégie.

Par conséquent, selon les demandes de ressources des autres concurrents à l'étape $t + 1$, le mobile u peut se voir attribuer une quantité de bande passante différente de ce qu'il a anticipé, à de l'étape t , indépendamment du résultat de sa prédiction. Selon les mobiles rattachés à la cellule $Cell(u, t + 1)$ le mobile u aperçoit une utilité différente de ce qu'il espérait. Selon la figure 4.4, deux situations sont alors possibles :

- i. Considérons un utilisateur mobile, soit u' , rattaché à la même cellule que le mobile u mais qu'il ne l'avait pas prédit, c'est-à-dire que $Cell(u', t + 1) = Cell(u, t + 1)$ et $Pred(u', t) \neq Cell(u', t + 1)$. Durant l'étape t , le mobile u' n'était pas un concurrent du mobile u lors du processus d'apprentissage anticipé à l'étape $t + 1$ (u' n'avait pas prédit la même cellule que u).

La présence du mobile u' n'a pas été anticipée par le mobile u , et il va le concurrencer pour accéder à une partie des ressources de la cellule de rattachement $Cell(u, t + 1)$.

- ii. Un mobile u'' a prédit la même cellule que le mobile u , autrement dit $Pred(u'', t) = Cell(u, t + 1)$. Les mobiles u et u'' ont tous les deux, durant l'étape t , anticipé le processus d'apprentissage pour la même cellule prédite. Après le déplacement, le mobile u'' se rend compte qu'il a fait une mauvaise prédiction. Par conséquent, il ne se rattachera pas à la même cellule que le mobile u à l'étape $t + 1$. L'utilité du mobile u est différent de celle espérée étant donné que le profil stratégique a changé. Il risque de regretter son choix de stratégie.

En résumé, la prédiction d'un déplacement vers une cellule ainsi que la présence de certains utilisateurs dans cette cellule n'est pas toujours juste. Dans le cas où la prédiction de la mobilité de u est juste, celle des autres mobiles peut ne pas l'être. En effet, le départ ou l'arrivée d'un nouvel utilisateur dans la cellule change son contexte. Cela perturbe ce que le mobile u a anticipé et diminue son gain.

Dans une situation idéale, tous les mobiles ont une prédiction juste. La quantité de ressources qu'ils ont prévu d'avoir leur sera effectivement allouée par la cellule de connexion après le déplacement.

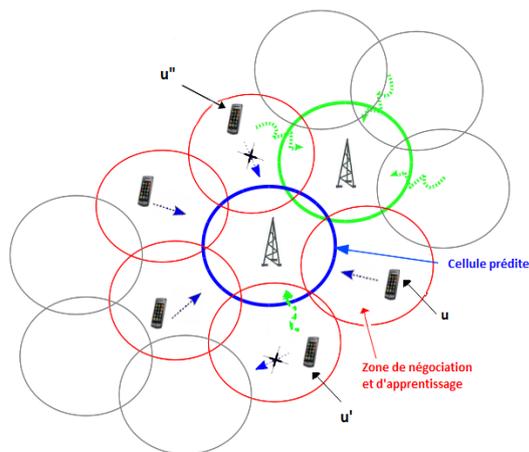


FIGURE 4.4 – Gestion prédictive de partage des ressources : attribution des ressources par la cellule de connexion.

4.3.2.3 Attribution des ressources par priorité

Afin d'appliquer une équité entre les mobiles, nous introduisons un système de priorité entre les demandeurs de ressources selon le résultat de la prédiction de leurs mobilités. Ainsi, un mobile qui prédit mal son déplacement sera pénalisé en étant moins prioritaire durant la phase d'attribution des ressources de la femtocellule de rattachement.

Considérons un utilisateur mobile u qui prédit son déplacement vers une femtocellule. En intégrant le jeu de partage de ressources, il prépare sa stratégie de demande de ressources pour cette cellule. Après le déplacement, dans le cas où sa prédiction est fautive, la cellule de connexion lui alloue une quantité de ressources selon ses disponibilités. Cette quantité risque de ne pas satisfaire la demande du mobile u puisqu'il utilise la stratégie qu'il a anticipé pour une autre cellule.

Dans le cas où le mobile u prédit juste son déplacement, il est connecté à la femtocellule prédite, soit f_i , et joue la stratégie $s_u^*(t+1)$ vers laquelle le processus d'apprentissage anticipé a convergé. Deux scénarios sont possibles selon le contexte de la femtocellule f_i au moment du rattachement effectif du mobile u :

- **Scénario 1** : Le contexte de la cellule n'a pas changé à l'arrivée du mobile u par rapport à ce qu'il a anticipé. Tous les mobiles contre qui le mobile u a appris à jouer ont bien prédit la femtocellule f_i . L'utilité de u est celle espérée et la cellule de connexion lui allouera la quantité de ressources qu'il a anticipée.
- **Scénario 2** : Le contexte de la femtocellule f_i a changé avec l'arrivée d'un nouveau mobile u' qui ne l'avait pas prédite.

Soit M l'ensemble des mobiles connectés à la femtocellule f_i tel que $M = M_1 \cup M_2$, où M_1 est l'ensemble des mobiles qui ont bien prédit la cellule f_i et qui sont effectivement connectés à elle, comme u . Le sous-ensemble M_2 est l'ensemble des mobiles qui ont mal prédit leurs déplacements et qui se retrouvent connectés à la

cellule f_i . La capacité disponible $Cap(f_i)$ de la femtocellule f_i est alors attribuée en priorité aux mobiles de M_1 , chacun selon son profil, et tel que :

$$\sum_{u_i \in M_1} Cap_{all}(u_i) \leq Cap(f_i)$$

La capacité restante, notée $Cap'(f_i)$, est telle que :

$$Cap'(f_i) = Cap(f_i) - \sum_{u_i \in M_1} Cap_{all}(u_i)$$

La station de base de la femtocellule f_i attribue cette quantité de ressources restante $Cap'(f_i)$ aux mobiles du sous-ensemble M_2 selon leurs profils et tel que :

$$\sum_{u_j \in M_2} Cap_{all}(u_j) \leq Cap'(f_i)$$

Ainsi, la satisfaction d'un utilisateur mobile ne dépend que de la prédiction de son propre déplacement et de ses stratégies possibles durant le processus d'apprentissage du jeu de partage des ressources.

4.4 Analyse des performances

Afin d'analyser les performances de l'approche proposée, nous ciblons un utilisateur mobile, soit u , que nous observons pendant ses déplacements dans un environnement défini. Dans chaque femtocellule visitée f_i de la trace, on admet la présence de douze (12) clients (le mobile observé compris) en compétition pour accéder aux ressources de la cellule f_i . Ces mobiles demandent des capacités en ressources différentes. Chacun d'entre eux ayant une sensibilité α différente : 6 mobiles sont sensibles à la QoS tandis que les autres sont sensibles au prix.

Nous admettons que toutes les femtocellules du réseau ont la même capacité en ressources. On fait varier cette capacité afin d'évaluer les performances de l'approche que nous proposons. Chaque valeur de la capacité correspond à une valeur de la charge de ces femtocellules. En effet, nous définissons la charge $Load(f_i, t)$ d'une femtocellule f_i comme le ratio entre la capacité requise par les mobiles connectés à sa station de base et sa capacité disponible, c'est-à-dire que :

$$Load(f_i, t) = \frac{\sum_{u_i / Cell(u_i, t) = f_i} Cap_{Req}(u_i, t)}{Cap(f_i)}$$

4.4.1 Scénarios considérés

Nous nous intéressons à l'évaluation du taux de satisfaction du mobile observé u en termes d'utilité. Nous évaluons également la quantité de ressources qu'il a obtenue de la cellule de connexion après chaque handover. On rappelle que l'utilité $Util_u(t)$ dépend de

la stratégie adoptée $s_u(t)$ et de la quantité de bande passante demandée par le mobile u . Nous évaluons les performances de l'approche par simulations et avec un niveau de confiance de 95%. A chaque connexion à une nouvelle cellule du réseau, on considère les quatre scénarios possibles suivants :

- **Scénario SP** (Sans Prédiction) : l'algorithme de prédiction de la mobilité n'est pas utilisé. Les utilisateurs mobiles considèrent le modèle de base de gestion des ressources. Dans ce scénario, le processus d'apprentissage du jeu de partage de ressources comporte, au maximum, 90 tours, sachant que le nombre moyen de tours nécessaires pour que le processus converge est de 115 tours d'apprentissage. Comme ce scénario simule une approche de gestion des ressources sans prédiction, le processus d'apprentissage n'est exécuté que lorsque le handover est demandé. Ce qui explique le nombre de tours limité.
- **Scénario PJ_1** (Prédiction Juste 1) : la prédiction de la mobilité est considérée dans le mécanisme de gestion des ressources. Dans ce scénario, tous les mobiles concurrents ainsi que u font une prédiction juste.
- **Scénario PJ_2** (Prédiction Juste 2) : la prédiction de la mobilité est considérée et le mobile observé fait une prédiction juste. Par contre, certains mobiles concurrents font une prédiction fautive, ce qui entraîne des départs de la cellule de connexion par rapport au contexte que le mobile u a anticipé. Nous considérons un taux moyen de départ de 20%. En effet, selon les résultats présentés dans [19], la probabilité d'avoir une prédiction juste est en moyenne de 0.8. Cette probabilité est obtenue lorsque les déplacements du mobile sont réguliers durant certaines phases et sont irréguliers durant d'autres.
- **Scénario PF** (Prédiction Fausse) : la prédiction de la mobilité est considérée et le mobile observé u fait une mauvaise prédiction de son prochain déplacement. Il est moins prioritaire lors de l'attribution des ressources.

4.4.2 Résultats numériques

Dans le but de simuler les scénarios présentés ci-dessus, nous considérons 10 utilisateurs mobiles à observer séparément durant leurs déplacements. Les données de ces déplacements sont réelles et ont été recueillies sur les terminaux mobiles appartenant à des membres de la communauté Rice⁷. La collecte des données a duré entre trois et six semaines, en fonction des participants [52]. En utilisant les mesures réalisées à partir du signal réseau WiFi des terminaux, une trace de mobilité est extraite pour chaque utilisateur mobile ciblé. Ainsi, chaque trace représente toutes les cellules visitées par un mobile durant la période de collecte d'informations.

Le tableau 4.4 présente le taux moyen de prédiction juste de chacun des utilisateurs mobiles observés ainsi que la longueur de leurs traces de mobilité. Les déplacements de chaque mobile sont caractérisés selon leur régularité (prévisibles ou difficile à prédire). Ainsi un mobile est régulier, irrégulier ou mixte.

7. *Université Rice : université américaine située à Houston (Texas)*

Utilisateur mobile	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6	u_7	u_8	u_9	u_{10}
Taille de la trace (cellules)	2762	1629	5294	7286	870	4467	4496	5496	2705	2690
Taux de prédiction juste (%)	65	30	81	47	63	68	45	52	29	35

TABLE 4.4 – Taux de prédiction juste pour différents utilisateurs mobiles

Nous constatons que quel que soit le mobile observé u_i tel que $i \in \{1, \dots, 10\}$, les performances de l'approche de gestion prédictive des ressources sont presque les mêmes pour un scénario donné. En effet, le même environnement (capacité, concurrents, ...) est considéré pour chaque mobile observé. Nous présentons dans ce qui suit les courbes obtenues pour 3 types de mobiles (régulier, irrégulier et mixte). Ces mobiles sont caractérisés par des profils de déplacements différents et avec différentes tailles de traces de mobilité.

Les figures 4.5 et 4.6 présentent respectivement l'utilité ainsi que la quantité de ressources obtenues par les utilisateurs observés pendant leurs déplacements pour différents niveaux de charge des cellules visitées. Nous varions cette charge entre 0.5 et 1.3.

Lorsque les cellules sont faiblement chargées (charge à 0.5), le modèle de base de gestion de partage des ressources (scénario SP) permet d'avoir de bonnes performances. A chaque déplacement, la station de base de la femtocellule dispose d'assez de ressources pour satisfaire toutes les demandes des mobiles connectés à elle. Cependant, quand la charge des cellules augmente, l'utilité du mobile observé diminue jusqu'à atteindre 0 à partir d'une charge égale à 1. En effet, l'attribution et l'allocation des ressources aux mobiles devient plus difficile pour la station de base et donc le nombre de tours d'apprentissage (limité) devient insuffisant pour converger vers une stratégie à jouer.

L'introduction de la prédiction de la mobilité dans le modèle de gestion des ressources permet d'améliorer l'utilité du mobile observé. Cela est vrai lorsque la prédiction de sa mobilité est juste (scénario PJ_1), quel que soit le résultat de prédiction de la mobilité des mobiles concurrents (scénario PJ_2), et quelle que soit la charge des cellules visitées. En effet, l'algorithme d'apprentissage a suffisamment de temps pour converger vers une stratégie à jouer.

D'une façon expérimentale et selon les données réelles collectées, nous avons vérifié que le temps moyen de résidence dans une femtocellule est suffisant pour que l'algorithme d'apprentissage converge vers la stratégie qui maximise l'utilité du mobile. Cela justifie l'utilité à 0.9, même quand les cellules sont chargées pour le scénario PJ_1 .

Dans un premier temps, nous considérons les mobiles ayant des déplacements mixtes tel que le mobile u_1 . Ce mobile est observé pendant qu'il se déplace à travers les 2762 cellules de sa trace. Étant donné la longueur de cette trace et les informations qu'elle contient, ce mobile est caractérisé par des déplacements réguliers (facile à prédire) dans certaines régions et irréguliers (difficile à prédire) dans d'autres.

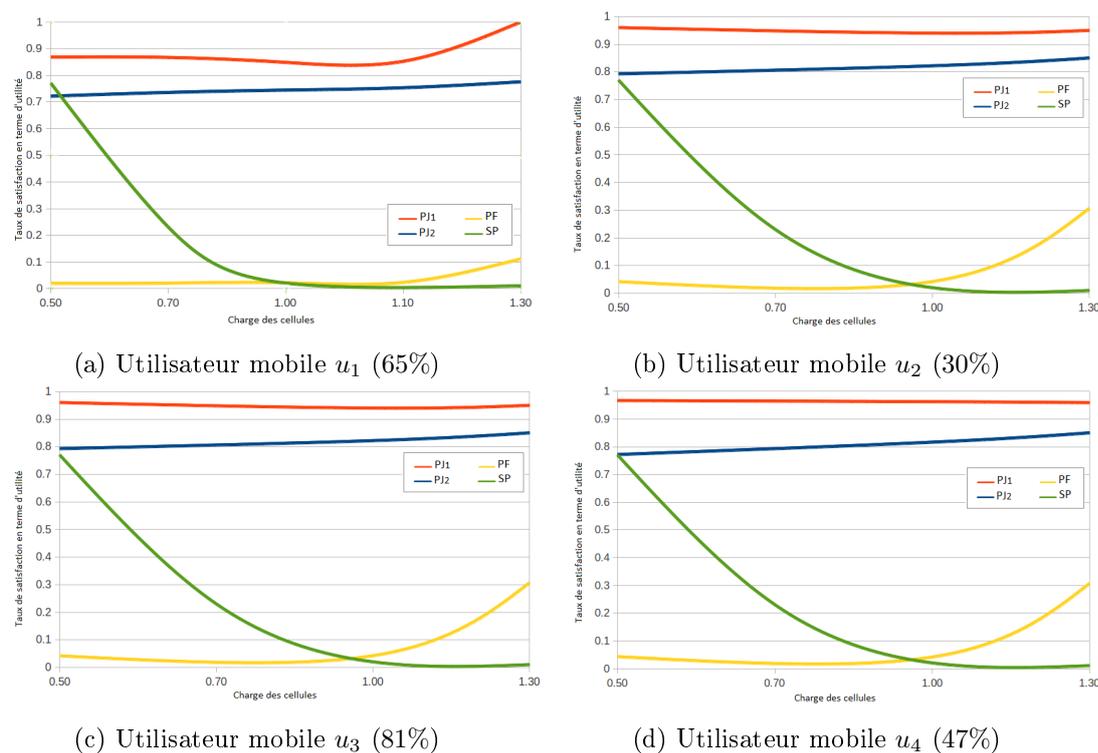


FIGURE 4.5 – Utilité obtenu par les utilisateurs mobiles observés

Étant donné les résultats de la prédiction présentés dans le tableau 4.4, le mobile u_1 a un taux moyen de prédiction juste de 65%. Selon la charge de la cellule visitée et le résultat de la prédiction, le mobile reçoit à chaque déplacement une quantité de ressources qui correspond à une utilité obtenue selon le scénario PJ_1 (prédiction juste) dans 65% des cas (ou PJ_2 selon le taux de prédiction de ses concurrents). Dans les 35% des cas restant, le mobile u_1 prédit mal son déplacement et se retrouve dans le scénario PF .

Observons maintenant le mobile u_3 qui est caractérisé par des déplacements réguliers. Ce mobile a plus de chance (81%) de voir sa demande de ressources totalement satisfaite (ou presque selon les concurrents) qu'un mobile avec un taux de prédiction juste inférieur tel que u_4 ou u_8 .

Lorsque le mobile u_2 est observé, on voit qu'il reçoit une quantité de ressources qui ne satisfait pas forcément sa requête de demande de ressources, et cela durant 70% de ses déplacements. La quantité allouée reste néanmoins plus satisfaisante que dans une approche de base de gestion des ressources (SP), quelle que soit la charge de la cellule visitée comme montré dans la figure 4.6b.

Par conséquent, un mobile peut se retrouver dans l'un des scénarios présentés ci-

dessus selon le taux de prédiction de sa mobilité. Quel que soit le mobile observé u_i , avec $i \in \{1, \dots, 10\}$, lorsqu'il prédit mal son déplacement (scénario PF), son utilité diminue. En effet, les stratégies adoptées n'ont pas été calculées pour la cellule de connexion actuelle, mais plutôt pour la cellule prédite. De plus, le mobile u_i est moins prioritaire que les mobiles présents dans la cellule de rattachement et qui ont bien prédit cette cellule. Ces mobiles sont servis en priorité par la station de base de la femtocellule.

Ce phénomène est visible dans la figure 4.6a quand le mobile u_1 obtient une quantité de bande passante inférieure dans le scénario PF , puisqu'il est moins prioritaire que dans les scénarios PJ_1 et PJ_2 . Par ailleurs, même si l'utilité du mobile u_1 dans le scénario PF est inférieure à celle du scénario SP , la quantité de ressources allouée est supérieure. Cela est dû au fait que l'utilité dépend de la stratégie adoptée et de la satisfaction du mobile par rapport aux stratégies de ses concurrents.

Lorsque tous les utilisateurs, rattachés à la même femtocellule que le mobile observé u_i ont une prédiction juste (scénario PJ_1), l'utilité obtenue par le mobile u_i est maximal (en moyenne 0,9). Par contre, si au moins un des concurrents fait une mauvaise prédiction (scénario PJ_2), l'utilité et la quantité de bande passante obtenue diminuent par rapport au scénario PJ_1 , et cela quelle que soit la charge considérée des cellules visitées. En effet, le profil stratégique des mobiles ne permet plus d'atteindre l'état d'équilibre prévu. La stratégie adoptée par le mobile u_i ne garantit pas une utilité maximale puisque les concurrents ont changé. Durant le processus d'apprentissage, le mobile observé prévoit que la station de base ne peut servir toutes les requêtes par manque de ressources. Dans ce cas, il existe des mobiles, soit u' , que la femtocellule n'a pas prévus de servir (selon la politique d'attribution). Ainsi, lorsqu'un des mobiles gourmands en ressources ne se connecte pas à la cellule comme prévu (mauvaise prédiction), la capacité disponible restante est plus élevée que prévu lors de l'apprentissage. Dans ce cas, le mobile u' , à qui la cellule n'a pas prévu d'allouer de la ressources par manque de capacité, est sélectionné pour être servi. En effet, la cellule décide plutôt de satisfaire la quantité minimale demandée par le mobile gourmand u' que de satisfaire totalement les demandes des autres mobiles comme u_i . Cela explique les performances obtenues lors du scénario PJ_2 dans les figures 4.5 et 4.6. L'exemple suivant illustre ce phénomène :

- **Exemple :** Considérons 4 mobiles u_1, u_2, u_3 et u_4 qui prédisent de se déplacer vers la femtocellule f_i . La capacité de cette dernière est de 20 unités en ressources garanties et 0 unités en non garanties. Chacun des mobiles anticipe le processus d'apprentissage afin de préparer le jeu de partage des ressources de f_i . Le tableau 4.5 présente les stratégies vers lesquelles le processus d'apprentissage a convergé pour chacun des mobiles. Il présente également la quantité de ressources que les mobiles prévoient de recevoir en réponse à leurs demandes de ressources.

La femtocellule f_i satisfait la demande minimale $m_{u_3} = 14$ et $m_{u_1} = 5$ dans l'ordre. En effet, puisque u_3 demande la quantité la plus élevée de ressources entre ces concurrents, il est servi en priorité pour que f_i maximise son gain (voir Section 4.2.1) puis le mobile u_1 . La quantité de ressources restantes (1 unité de ressources garantie) ne permet pas de satisfaire les demandes des autres mobiles. Dans cet exemple, la station de base de la femtocellule rajoute de la ressource aux mobiles u_1 et u_3 équitablement et proportionnellement selon leurs demandes maximales.

Utilisateur mobile	requête $(m_{u_i}^G, M_{u_i}^G)$	Capacité pré-allouée	
		Garantie	Non garantie
u_1	(5 , 8)	5.6	0
u_2	(10 , 12)	0	0
u_3	(14 , 16)	14.4	0
u_4	(8 , 8)	0	0

TABLE 4.5 – Stratégies de demande de ressources et les réponses prévues de la cellule prédite

Après déplacement des utilisateurs, le mobile u_3 fait une prédiction fautive et les autres mobiles jouent les stratégies préparées. Le tableau 4.6 présente la décision d’attribution des ressources prise par la station de base de la femtocellule de connexion.

Puisque le mobile u_3 ne se rattache pas à la cellule f_i , le mobile u_2 devient le plus gourmand parmi les demandeurs. En effet, contrairement à ce qui était prévu lors de l’apprentissage anticipé, le nouvel ordre de service devient u_2 puis u_4 . Par manque de ressources, le mobile u_1 n’est pas servi.

Utilisateur mobile	requête $(m_{u_i}^G, M_{u_i}^G)$	Capacité allouée	
		Garantie	Non garantie
u_1	(5, 8)	0	0
u_2	(10, 12)	12	0
u_3	(14, 16)	–	–
u_4	(8 , 8)	8	0

 TABLE 4.6 – Stratégies jouées et quantités de ressources réellement allouées par f_i

4.5 Conclusion

L’objectif de ce chapitre est d’adapter le modèle de gestion de partage des ressources proposé dans [5] aux réseaux mobiles de dernière génération. Cela est possible en anticipant le processus de handover demandé par un utilisateur mobile. Pour cela, nous avons utilisé dans ce travail une approche de prédiction de la mobilité basée sur les chaînes de Markov. Les performances de l’approche que nous proposons ont été analysées par simulations en utilisant des traces de mobilité réelles. Des mobiles avec différents types

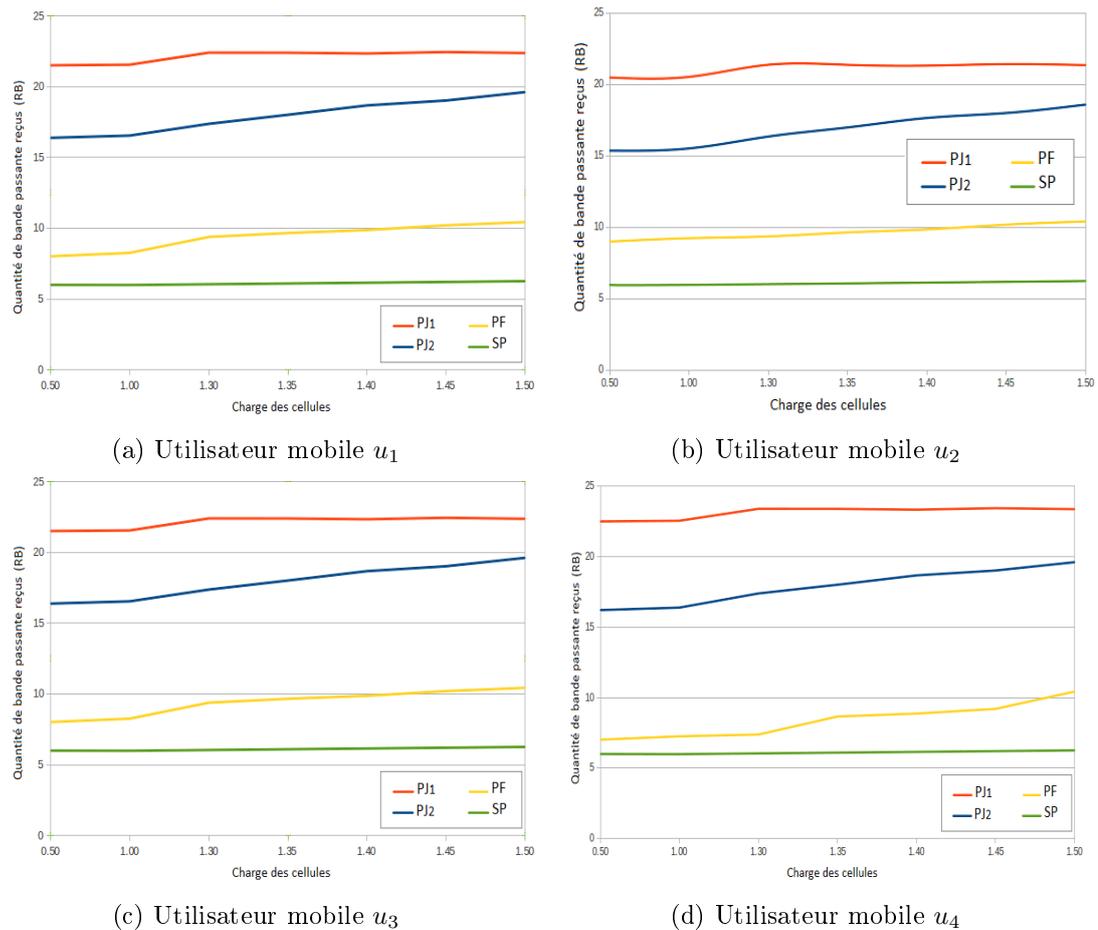


FIGURE 4.6 – La QoS obtenue pour les utilisateurs mobiles observés

de déplacements (réguliers, irréguliers ou mixte) ont été ciblés afin d'observer la quantité de ressources qu'ils obtiennent ainsi que le taux de satisfaction de chacun d'entre eux en termes d'utilité.

Nous avons considéré plusieurs scénarios de prédiction de la mobilité (juste ou fausse) du mobile observé ainsi que l'impact du résultat de la prédiction des mobiles concurrents sur l'utilité du mobile ciblé.

Les résultats obtenus ont été comparés à ceux d'un scénario basique de gestion de partage des ressources (sans prédiction de la mobilité). Ces résultats ont montré qu'anticiper le déplacement des mobiles permet d'améliorer l'utilité quelle que soit la charge des cellules visitées. Cependant, ces améliorations dépendent du profil des déplacements de mobile (régulier, irrégulier ou mixte) et de la richesse en informations de son historique de déplacement (la longueur de sa trace de mobilité).

Dans ce chapitre, nous avons contrôlé la quantité de ressources à allouer dans une seule femtocellule afin de satisfaire les utilisateurs connectés à sa station de base. Cependant, ce type de cellule (femto) a une capacité limitée comparée à celle des macrocellules. De plus, selon les caractéristiques physiques de ces dernières, chaque ressource allouée

engendre une augmentation de la quantité d'énergie consommée de sa station de base. Le but du chapitre suivant est de réduire la consommation énergétique des stations de base des cellules (femto et macro) du réseau. Cela est possible en contrôlant la sélection de la cellule (femto ou macro) de rattachement des utilisateurs, ce qui permet aux stations de base de limiter la quantité de ressources à allouer et satisfaire ainsi plus de clients de l'opérateur mobile.

Chapitre 5

Modèle et algorithmes pour l'affectation des utilisateurs

5.1 Introduction

Dans ce chapitre nous proposons deux approches de contrôle de la consommation énergétique des stations de base. En effet, comme montré dans d'autres travaux (voir Chapitre 2), la consommation d'énergie des réseaux mobiles dépend directement de la charge du trafic circulant dans ces réseaux. La plupart des travaux dans la littérature (voir Section 2.5) se basent sur la désactivation des stations de base des femtocellules pendant les périodes de faible charge. Cela permet de limiter l'activation inutile de certaines stations de base (vides) durant ces périodes.

L'objectif de ce travail est de proposer un contrôle de la consommation énergétique des stations de base, quel que soit leur niveau de charge. Il consiste en un équilibrage réfléchi du trafic basé sur la gestion d'affectation des utilisateurs aux cellules détectées.

Dans ce chapitre, la mobilité des utilisateurs n'est pas considérée lors du contrôle de la consommation énergétique globale du réseau étant données les positions des utilisateurs dans la couverture. Pour cela, deux approches sont proposées. Elles sont principalement basées sur des algorithmes gloutons, qui sont de faible complexité et qui permettent des approches en ligne. Ces approches sont faciles à implémenter et adaptées aux problèmes de gestion des petites cellules (dont les femtocellules), notamment les contraintes temps réel engendrées.

Dans ce qui suit, nous présentons l'architecture des réseaux mobiles considérée ainsi que les caractéristiques de chacun de ses acteurs. Nous définissons par la suite les approches de gestion que nous proposons et leurs algorithmes de contrôle. Les performances de ces approches sont évaluées et comparées à d'autres stratégies, notamment celle adoptée par certains opérateurs mobiles.

5.2 Modèle de gestion d'affectation des utilisateurs

Nous considérons un réseau LTE hétérogène composé des stations de base de grandes cellules (macrocellules) et de petites cellules (femtocellules). Dans la zone de couverture de chaque macrocellule, un ensemble de femtocellules est déployé par le même opérateur

mobile. Nous rappelons qu'une interface logique $X2$ relie les deux types de cellules afin de faciliter la communication entre elles (voir Chapitre 2 page 12). Cela permet également la réalisation d'un handover dit vertical. Il consiste à transférer la communication d'un utilisateur connecté à la station de base de la macrocellule vers celle de la femtocellule. L'inverse est également possible. Ce transfert peut être une conséquence de la demande de l'utilisateur dû à son déplacement ou à un équilibrage de la charge entre les deux cellules. Un tel réseau est déployé dans les zones urbaines et son objectif est de garantir une communication des données avec une QoS satisfaisante [24, 22]. La figure 5.1 présente l'architecture considérée des réseaux mobiles. Le terminal d'un utilisateur est capable de détecter soit des macrocellules uniquement (utilisateur u_1 dans la figure 5.1), ou des macrocellules et des femtocellules en même temps (utilisateur u_2). Notons qu'un utilisateur ne peut pas être couvert que par des femtocellules.

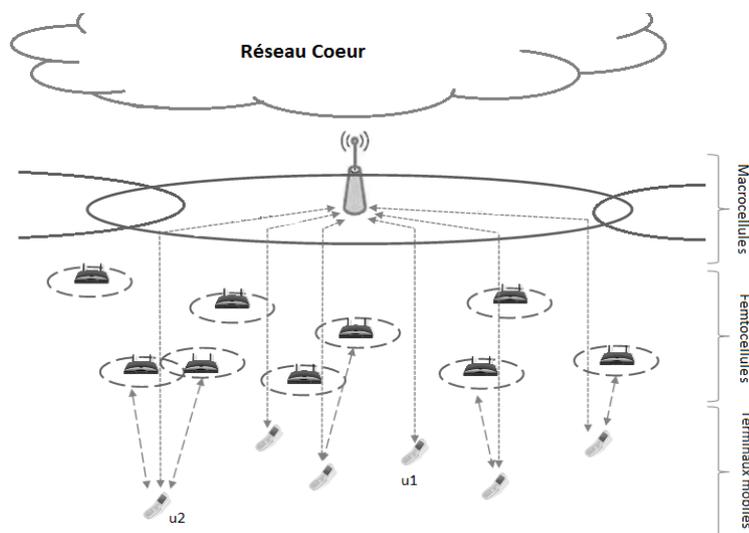


FIGURE 5.1 – Architecture d'un réseau LTE hétérogène

5.2.1 Acteurs

On considère trois acteurs qui communiquent entre eux : l'utilisateur, la femtocellule et la macrocellule. Nous nous intéressons aux utilisateurs dont le terminal détecte les deux types de cellules (femto et macro). Dans ce qui suit, nous définissons chacun des acteurs ainsi que les paramètres qui les caractérisent.

- **Utilisateur**

Considérons un utilisateur u localisé dans la zone de couverture d'une femtocellule f . On note $CouvMob(f)$ l'ensemble des utilisateurs localisés tels que u .

Nous définissons $Femto(u) = \{f : u \in CouvMob(f)\}$ comme l'ensemble des femtocellules composant la zone de couverture où se trouve u .

Lorsque l'utilisateur u est rattaché à une cellule (femto ou macro), notée $Cell(u)$, il est réellement connecté à sa station de base, si cette dernière lui alloue une quantité de ressources. Cette cellule peut être :

- une femtocellule détectée $f \in Femto(u)$; $Cell(u) = f$,
- une macrocellule m qui couvre au moins une femtocellule dans $Femto(u)$; $Cell(u) = m$,
- aucune cellule si u n'est pas rattaché et donc pas servi ; $Cell(u) = \emptyset$.

Un utilisateur u est également caractérisé par sa requête de demande de ressources $Cap_{req}(u)$, en termes de *Resource Block* [81]. C'est la capacité dont il a besoin pour maintenir sa connexion. De la même façon, nous définissons $Cap_{all}(u)$ la quantité de ressources allouée par la cellule de connexion $Cell(u)$ à u . Notons que si $Cell(u) = \emptyset$ alors $Cap_{all}(u) = 0$.

• Femtocellule

Une femtocellule f est caractérisée par l'état de sa station de base, noté $St(f)$, tel que :

$$St(f) = \begin{cases} On & \text{si } f \text{ est activée} \\ Off & \text{si } f \text{ est désactivée} \end{cases}$$

Selon l'architecture réseau que nous considérons, une femtocellule f peut être couverte par une ou plusieurs macrocellules. L'ensemble de ces macrocellules est noté $Mac(f)$.

Dans ce modèle, nous supposons l'existence d'une connexion logique qu'une femtocellule propose aux utilisateurs présents dans sa zone de couverture. Cette connexion ne permet pas l'accès aux ressources de la station de base, mais juste un échange de données (négociation) entre l'utilisateur et le réseau avant la connexion effective, c'est-à-dire l'allocation de ressources. Ainsi, une femtocellule f est caractérisée par l'ensemble des utilisateurs connectés logiquement à sa station de base. Cet ensemble est noté $Ulog(f)$, tel que $Ulog(f) = \{u / f \in Femto(u)\}$.

Lorsqu'un utilisateur u est servi par une femtocellule f , il est physiquement connecté à sa station de base. On définit l'ensemble des utilisateurs connectés physiquement à la station de base de f , noté $Mob(f)$, tel que $Mob(f) = \{u / Cell(u) = f\}$ et $Mob(f) \subseteq Ulog(f)$.

Étant donné les caractéristiques physiques des stations de base des femtocellules (voir Section 2.5 page 21), la capacité d'une femtocellule f est définie par le nombre d'utilisateurs connectés physiquement à sa station de base et non par la quantité de ressources qui leurs sont allouées [38]. Une femtocellule peut servir simultanément un nombre d'utilisateurs, noté $Fconnect(f)$, tel que $Fconnect(f) = Fconnect_0 - |Mob(f)|$, c'est-à-dire que $0 \leq Fconnect(f) \leq Fconnect_0$.

Nous notons $Fconnect_0$ le nombre initial d'utilisateurs qui peuvent être connectés simultanément à la station de base d'une femtocellule. Ainsi, nous définissons la charge réelle d'une femtocellule f , notée $Load(f)$, comme suit :

$$Load(f) = \frac{|Mob(f)|}{Fconnect_0} \tag{5.1}$$

• **Macrocellule**

Une macrocellule m est caractérisée par l'ensemble des utilisateurs $Mob(m)$ rattachés à sa station de base, c'est-à-dire que $Mob(m) = \{u / Cell(u) = m\}$. Initialement, chaque macrocellule dispose d'une capacité $MCap_0$, en termes de ressources, qu'elle peut allouer aux utilisateurs qui se connecteront à sa station de base. Lorsque des utilisateurs sont servis par m , la capacité disponible de cette dernière, notée $Cap(m)$, est définie par :

$$\sum_{u \in Mob(m)} Cap_{all}(u) \leq Cap(m) \leq MCap_0$$

Contrairement aux femtocellules, nous définissons la charge réelle d'une macrocellule, notée $Load(m)$, selon la capacité totale allouée à tous les utilisateurs connectés à la station de base de m , comme suit :

$$Load(m) = \frac{\sum_{u \in Mob(m)} Cap_{all}(u)}{MCap_0} \quad (5.2)$$

Une macrocellule m est également caractérisée par l'ensemble des femtocellules couvertes par m , noté $CouvFem(m)$.

La liste des notations utilisées est présentée dans la page xvii.

5.2.2 Propriétés énergétiques

La consommation d'énergie d'une cellule (femto ou macro) dépend principalement du nombre d'utilisateurs connectés à sa station de base. Plus précisément, elle dépend de la quantité de ressources que sa station de base alloue aux utilisateurs connectés à elle (voir Section 2.5). Ainsi, selon l'équation 2.1 (page 22), le coût énergétique d'une cellule est une fonction linéaire de la charge réelle de la cellule selon son type (femto ou macro). Rappelons que la station de base d'une macrocellule est toujours active tandis que celle d'une femtocellule peut être désactivée. Par conséquent, nous définissons séparément les fonctions de coût énergétique d'une femtocellule et d'une macrocellule.

Pour une macrocellule m , la fonction de coût énergétique, notée $E_{Macro}(m)$, est définie par :

$$E_{Macro}(m) = \mathcal{M}_1(Load(m)) + E_{Macro}^0 \quad (5.3)$$

Où \mathcal{M}_1 est une fonction linéaire de la charge réelle de la macrocellule m . On note E_{Macro}^0 le coût énergétique de la cellule lorsqu'aucun utilisateur n'est connecté à sa station de base, ce qui correspond à une cellule vide [38].

La fonction de coût énergétique d'une femtocellule f , notée $E_{Femto}(f)$, dépend principalement de l'état $St(f)$ de sa station de base (ON , OFF), telle que :

- $E_{Femto}(f) = 0$ si la station de base de f est désactivée, c'est-à-dire que $St(f) = Off$.
- $E_{Femto}(f) = E_{Femto}^0$ si la station de base de f est activée ($St(f) = ON$) et aucun utilisateur n'est connecté à elle. E_{Femto}^0 est un nombre réel qui représente la consommation d'énergie d'une femtocellule vide.

- Si la station de base de f est activée et, au moins, un utilisateur est connecté à elle, alors :

$$E_{Femto}(f) = \mathcal{M}_2(\text{Load}(f)) + E_{Femto}^0$$

L'impact de la charge d'une cellule (femto ou macro) sur sa consommation énergétique est présenté dans la figure 2.8 (page 22). La consommation d'énergie d'une station de base de femtocellule étant moins sensible à la charge que celle d'une station de base de macrocellule, la fonction de coût énergétique de cette dernière est proportionnelle à la capacité de ressources allouées. La capacité allouée dépend à son tour de la politique d'allocation des ressources de la station de base comme nous le verrons dans la section suivante.

5.2.3 Allocation des ressources

Comme c'est déjà mentionné, toute cellule c (femto ou macro) dispose d'une capacité limitée en termes de ressources qu'elle peut allouer aux utilisateurs rattachés à sa station de base.

Étant donné la portée limitée du signal de transmission de la station de base d'une femtocellule, la zone de couverture de cette dernière est plus petite que celle d'une macrocellule. En effet, nous considérons que la qualité du signal entre le terminal mobile et la station de base de la femtocellule n'influe pas sur la capacité allouée. De plus, la station de base d'une femtocellule est reliée directement au réseau filaire de l'opérateur mobile (voir Section 2.3). Ainsi, par hypothèse, si la requête d'un utilisateur u est satisfaite par une femtocellule alors la station de base de cette dernière lui alloue la quantité de ressources qu'il a demandé, c'est-à-dire que $Cap_{all}(u) = Cap_{req}(u)$. Autrement, lorsque la requête d'un utilisateur est satisfaite par une macrocellule, la capacité que cette dernière lui alloue peut différer de la quantité qu'il a demandé, telle que $Cap_{all}(u) \geq Cap_{req}(u)$. Notons qu'un utilisateur u rattaché à une cellule ($Cell(u) \neq \emptyset$) peut ne pas être servi, ainsi $Cap_{all}(u) = 0$.

Lorsque la cellule de connexion est une macrocellule, la capacité allouée à l'utilisateur dépend également de la qualité du signal et du canal de transmission (voir Section 3.3, page 28). Pour cela, nous considérons que cette qualité est inversement proportionnelle à la distance réelle entre le terminal mobile et la station de base de la macrocellule de connexion. C'est-à-dire que plus l'utilisateur est loin de la station de base, plus la qualité du signal diminue. Dans ce cas, la capacité allouée est plus grande que la capacité requise.

Afin de définir la qualité du signal entre un utilisateur et une macrocellule, nous considérons la distance entre la femtocellule à laquelle l'utilisateur est connecté logiquement et la macrocellule en question. Afin de modéliser un tel phénomène, nous considérons qu'une femtocellule f est caractérisée par un facteur de qualité du signal, noté $\mathcal{Q}(f, m)$, entre la station de base de f et la station de base de chaque macrocellule m telle que $m \in Mac(f)$. Ceci correspond à la position exacte de f dans la zone de couverture de m . Comme présenté dans la figure 5.2, trois niveaux de distance entre f et m sont considérés :

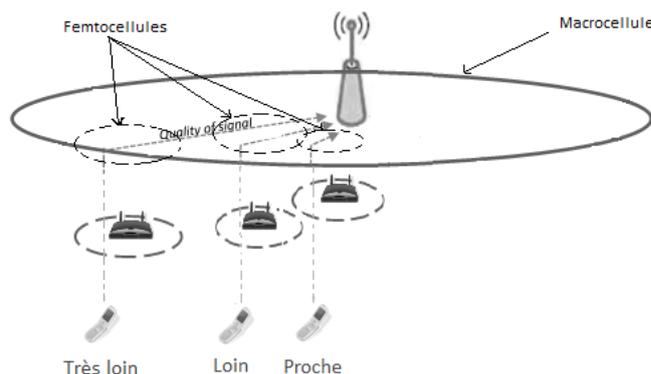


FIGURE 5.2 – Niveaux de distance entre un utilisateur et une station de base

- **proche** : bonne qualité du signal et $Q(f, m) = 0$,
- **loin** : qualité du signal moyenne et $Q(f, m) = 1$,
- **très loin** : mauvaise qualité du signal et $Q(f, m) = 3$.

D'après les connexions logiques entre les utilisateurs et les femtocelles qu'ils détectent, nous définissons $MinQ(u, m)$, un facteur de la qualité du signal entre l'utilisateur u et la station de base de la macrocellule m qui le couvre. Soit $Mac(u)$ l'ensemble des macrocellules couvrant les femtocelles détectées par l'utilisateur u tel que $Mac(u) = \bigcup_{f \in Femto(u)} Mac(f)$. Pour chaque couple utilisateur u et macrocellule détectée m , le facteur de la qualité du signal de la femtocelle f , tel que $f \in Femto(u)$, la plus proche de m est attribué à l'utilisateur u , c'est-à-dire que :

$$MinQ(u, m) = \min_{m \in Mac(u)} Q(f, m)$$

Le facteur $MinQ(u, m)$ peut prendre les valeurs 0, 1 ou 3. Ainsi, la capacité réellement allouée à l'utilisateur u par la macrocellule de connexion m est définie par :

$$Cap_{all}(u) = Cap_{req}(u) \times (1 + MinQ(u, m)) \quad (5.4)$$

5.3 Algorithmes de sélection de la cellule de connexion

Nous proposons dans cette section deux algorithmes de sélection de la cellule de connexion sur lesquels seront basées les approches de contrôle de la consommation d'énergie que nous présenterons dans les sections suivantes.

Soient U , F et M les ensembles des utilisateurs, des femtocelles et des macrocellules du réseau, respectivement. Chaque utilisateur $u \in U$ peut être affecté soit à une cellule dans l'ensemble des femtocelles détectées $Femto(u) \subseteq F$, soit dans l'ensemble des

macrocellules qui les couvrent $Mac(u) \subseteq M$. Un utilisateur est affecté à une cellule s_i , et seulement si, la capacité de cette dernière permet de satisfaire sa demande de ressources (en tenant compte du coût supplémentaire dû à l'éventuelle mauvaise qualité du signal des macrocellules). Ainsi, l'utilisateur est connecté à la cellule à laquelle il est affecté.

L'objectif est d'affecter chaque utilisateur $u \in U$ à une cellule, qui le couvre (femto ou macro) tout en minimisant le coût énergétique de cette affectation. Atteindre cet objectif revient à résoudre un problème d'optimisation qui peut être considéré comme un problème d'affectation et d'ordonnancement de tâches [28]. Une tâche représente la connexion qu'une cellule peut offrir à l'utilisateur avec une capacité définie. A chaque tâche (affectation) est associée une fonction de coût énergétique.

Le problème d'affectation des utilisateurs peut également être considéré comme un problème de couverture (*Set Cover Problem*) avec des capacités et des demandes indivisibles [82]. Le problème de couverture est défini par un ensemble X de n éléments, une collection S de k sous-ensembles de X , telle que $S = \{S_1, \dots, S_k\}$, et une fonction de coût $ct : S \rightarrow \mathbb{R}^+$. L'objectif est de trouver la collection de S de coût minimum couvrant tous les éléments de X . Dans le problème d'affectation des utilisateurs traité ici, les éléments de X sont les utilisateurs. Une collection S est une affectation des utilisateurs aux cellules du réseau, telle que chaque sous-ensemble S_i , avec $1 \leq i \leq k$, correspond à l'ensemble des utilisateurs connectés à la cellule i ($k = |F| + |M|$).

Ces problèmes sont NP-complets [83]. Étant donné une affectation des utilisateurs, on peut, avec une complexité linéaire en $O(|U| + |F| + |M|)$, calculer le nombre d'utilisateurs servis par chaque cellule et calculer la consommation énergétique du réseau.

Des heuristiques sont proposées dans la littérature afin de résoudre le problème de couverture ainsi que le problème d'affectation de tâches [84, 85, 28]. Ces heuristiques sont des algorithmes d'approximation qui permettent de calculer des solutions approchées au problème.

Cependant, la taille des réseaux mobiles et les données à traiter, rendent le problème plus complexe et nécessitant un temps de calcul assez long. D'autre part, la gestion de la mobilité des utilisateurs, notamment la sélection de la cellule de rattachement (traitée dans le chapitre 6), nécessite un temps de calcul très court par rapport au temps de résidence des mobiles dans la zone de couverture. De plus, avec le déploiement des petites cellules (pico et femto) ainsi que la vitesse avec laquelle les mobiles les traversent, les contraintes temps réel des réseaux mobiles sont encore plus strictes.

Pour cela, une adaptation de ces algorithmes d'approximation ne permet pas de résoudre le problème d'affectation des utilisateurs avec ces contraintes (temps, capacité et coût).

Nous proposons deux algorithmes gloutons qui sont de faible complexité et qui sont adaptés aux contraintes temps réel, notamment dans les réseaux mobiles. Les algorithmes gloutons sont utilisés pour résoudre les problèmes difficiles de grande tailles et pour lesquels des contraintes temps réel sont considérées. Par un traitement, étape par étape, avec un ensemble de choix à chaque étape, un algorithme glouton sélectionne une solution sans remise en cause du choix de l'étape précédente. Ce type d'algorithme est rapide et facile à concevoir et implémenter. Dans le problème d'affectation des utilisateurs, à une étape donnée, si un utilisateur mobile est affecté à une cellule, alors ce

choix n'est jamais remis en cause lors de l'affectation des autres utilisateurs.

Ainsi, le but principal des algorithmes gloutons d'affectation des utilisateurs que nous proposons n'est pas de connecter tous les utilisateurs dans U aux femtocellules ou aux macrocellules détectées, mais de trouver le bon compromis entre la consommation énergétique des cellules du réseau d'un côté, et le nombre d'utilisateurs qu'ils servent et la QoS qui leur a été offerte d'un autre côté. C'est-à-dire que l'objectif est de :

- maximiser le nombre total d'utilisateurs servis $\sum_{c \in FUM} |Mob(c)|$
- et
- minimiser la consommation énergétique globale du réseau, E_{Net} , avec

$$E_{Net} = \sum_{m \in M} E_{Macro}(m) + \sum_{f \in F} E_{Femto}(f) \quad (5.5)$$

Selon la charge réelle d'une cellule c (femto ou macro), nous définissons son état qui peut être :

- **Vide** : c'est une cellule à laquelle aucun utilisateur n'est connecté ;
- **Non-saturée** : au moins un utilisateur est connecté à sa station de base et sa capacité disponible permet de servir au moins un utilisateur supplémentaire ;
- **Saturée** : sa capacité disponible ne permet pas de servir d'autres utilisateurs.

Étant donné les propriétés énergétiques des stations de base (Figure 2.8) ainsi que la politique d'allocation des ressources, nous définissons un principe d'affectation pour chaque type de cellule. Ces principes ont pour but d'aider les algorithmes glouton d'affectation des utilisateurs à atteindre les objectifs déjà cités.

A l'inverse des macrocellules, la station de base d'une femtocellule vide peut être désactivée. De plus, une femtocellule saturée consomme pratiquement la même quantité d'énergie qu'une femtocellule non-saturée ou vide (voir Section 2.5). Par conséquent, le principe d'affectation des utilisateurs aux femtocellules a pour but de *minimiser* le nombre de femtocellules non-saturées. Cela revient à soit saturer les femtocellules, soit les laisser vides dans le but de les éteindre.

Pour ce qui est des macrocellules, rappelons que leurs stations de base ne peuvent être désactivées même lorsqu'elles sont vides. De plus, une macrocellule moins chargée consomme moins d'énergie. Ainsi, le principe d'affectation aux macrocellules a pour but de *maximiser* le nombre de macrocellules non-saturées. Cela revient à ne pas les laisser vides et à ne pas les saturer. Ainsi, chaque affectation d'un utilisateur à une femtocellule ou à une macrocellule doit respecter le principe général correspondant.

Nous proposons dans ce qui suit deux algorithmes gloutons qui permettent d'affecter les utilisateurs présents dans le réseau tout en respectant les principes d'affectation définis ci-dessus. À chaque étape d'exécution d'un tel algorithme, un utilisateur est sélectionné afin d'être affecté. Le premier algorithme essaye d'affecter tous les utilisateurs aux femtocellules. Les utilisateurs restants (non couverts par une femtocellule ou couvert par des femtocellules saturées) sont considérés pour une affectation aux macrocellules. D'une façon similaire, le deuxième algorithme vise à affecter les utilisateurs aux macrocellules. Les utilisateurs restants sont considérés pour une affectation aux femtocellules.

5.3.1 Algorithme d'affectation aux femtocellules

Le premier algorithme glouton que nous proposons a pour objectif d'affecter un ensemble utilisateurs U (un par un) à un ensemble de femtocellules F . L'algorithme repose sur la partition de l'ensemble des femtocellules F en trois sous-ensembles F_{-1} , F_0 et F_1 , mis à jour après chaque affectation d'un utilisateur par l'algorithme. Soit U' l'ensemble des utilisateurs non affectés tel que $U' \subset U$. Les sous-ensembles F_{-1} , F_0 et F_1 contiennent des femtocellules $f \in F$ comme suit :

- F_{-1} : le sous-ensemble des femtocellules saturées et/ou n'ayant que des utilisateurs déjà affectés dans leurs zones de couverture, tel que

$$f \in F_{-1} \iff \begin{cases} Fconnect(f) = 0 ; \text{ ou} \\ U' \cap CouvMob(f) = \emptyset \end{cases}$$

- F_1 : un sous-ensemble des femtocellules non-saturées, et ayant au moins un utilisateur non affecté dans leurs zones de couverture. Ce sous-ensemble contient les femtocellules les plus chargées et ayant le maximum d'utilisateurs non affectés dans leurs zones de couverture, tel que :

$$f \in F_1 \iff \begin{cases} f \in F \setminus F_{-1} ; \\ Fconnect(f) = \min_{f_i \in F \setminus F_{-1}} Fconnect(f_i) ; \\ |U' \cap CouvMob(f)| = \max_{f_i \in F \setminus F_{-1}} |U' \cap CouvMob(f_i)| ; \\ |F_1| = \rho \times |F \setminus F_{-1}| \end{cases}$$

Le sous-ensemble F_1 correspond aux femtocellules auxquelles l'utilisateur sélectionné sera potentiellement affecté par l'algorithme. Sa taille est limitée afin d'appliquer une certaine équité entre les utilisateurs.

- F_0 : le sous-ensemble des femtocellules restantes, c'est-à-dire que $F_0 = F \setminus (F_{-1} \cup F_1)$ ¹. Notons que $F_1 \cap F_0 = \emptyset$, et que $F_1 \cup F_0$ représente le sous-ensemble des femtocellules non-saturées ou vides et ayant au moins un utilisateur non affecté dans leurs zones de couverture.

Initialement, toutes les femtocellules sont vides et aucun utilisateur n'est affecté. Les sous-ensembles F_0 et F_1 contiennent tous les deux des femtocellules vides et ayant au moins utilisateur non affecté dans leurs zones de couverture. A chaque affectation d'un utilisateurs, l'algorithme met à jours les sous-ensembles F_{-1} , F_0 et F_1 . Le sous-ensemble F_1 est construit des femtocellules non-vides de $F \setminus F_{-1}$ et ayant le maximum d'utilisateurs dans leurs zones de couverture. Cela permet de contrôler le nombre de femtocellules vides sans sacrifier les utilisateurs servis.

Lorsque les sous-ensembles de femtocellules sont définis, et à chaque étape de l'algorithme d'affectation, on considère en priorité les utilisateurs qui détectent au moins

1. Rappelons que $A \setminus B = \{x \in A | x \notin B\}$

une femtocellule dans F_1 , c'est-à-dire $F_1 \cap Femto(u) \neq \emptyset$, et une dans F_0 . Cela permet de concentrer le flux des utilisateurs. Parmi ces utilisateurs, celui qui détecte le moins de cellules dans $F_1 \cup F_0$, soit u , est sélectionné pour être affecté à une femtocellule f telle que $f \in F_1 \cap Femto(u)$. En effet, si l'utilisateur u n'est pas servi à cette étape là, les femtocellules qu'il détecte risquent de ne plus avoir assez de capacité pour le servir par la suite puisque d'autres utilisateurs les détectent également.

Quant à la femtocellule $f \in F_1$ sélectionnée pour servir u , elle a un nombre maximal d'utilisateurs non affectés dans sa zone de couverture. Cette femtocellule a plus de probabilité d'être saturée par la suite. Notons que dans ce cas, seules les femtocellules du sous-ensemble F_1 sont considérées pour servir l'utilisateur u . Cela permet d'appliquer une certaine équité entre les utilisateurs qui détectent plus de femtocellules que d'autres et de maximiser le nombre de femtocellules vides qui peuvent être désactivées.

Lorsqu'un utilisateur est couvert par des femtocellules appartenant uniquement à F_1 (F_0 , respectivement), il est affecté à la femtocellule de F_1 (respectivement F_0) qui a le maximum d'utilisateurs non affectés dans sa zone de couverture.

Lorsque l'utilisateur sélectionné est affecté à une cellule de F_1 ou de F_0 , la capacité de cette cellule est mise à jour. Le sous-ensemble F_1 est également mis à jour et, si nécessaire, F_{-1} selon les définitions de construction de ces sous-ensembles présentées ci-dessus. En effet, si une femtocellule f de F_1 devient saturée en servant u en ressources, alors le sous-ensemble F_{-1} est mis à jour avec la femtocellule f . Un autre cas particulier qui nécessite une mise à jour de F_{-1} , est lorsqu'une femtocellule f n'ayant que l'utilisateur u dans sa zone de couverture. Lorsque ce dernier est servi par une autre femtocellule que f , cette dernière est transférée vers F_{-1} .

Le sous-ensemble F_1 est également mis à jour si $|F_1| < \rho \times |F_1 \cup F_0|$. Notons que le choix de la taille du sous-ensemble F_1 est fixé expérimentalement² $\rho = 20\%$. Le sous-ensemble F_1 est incrémenté avec la femtocellule de F_0 qui maximise le nombre d'utilisateurs non affectés dans sa zone de couverture.

Lorsqu'aucune nouvelle affectation n'est possible, l'algorithme arrive au terme de son exécution.

Exemple :

Soit un ensemble d'utilisateurs $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5\}$ et un ensemble de femtocellules $F = \{f_1, f_2, f_3, f_4\}$. La capacité de chaque femtocellule de F permet de servir deux utilisateurs simultanément. La figure 5.3a présente les connexions possibles entre les utilisateurs et les femtocellules : un lien relie l'utilisateur u_i et la femtocellule f_j , avec $i \in \{1, \dots, 5\}$ et $j \in \{1, \dots, 4\}$, si et seulement si f_j est détectée par le terminal mobile de u_i ; $f_j \in Femto(u_i)$.

Un degré est affecté à chaque femtocellule. Il représente le nombre d'utilisateurs non affectés dans sa zone de couverture.

— Initialement, les sous-ensemble F_0, F_1 et F_{-1} sont construits comme suit :

- $F_{-1} = \emptyset$ puisque toutes les femtocellules sont vides ;
- $F_0 = \{f_2, f_1, f_3, f_4\}$; les femtocellules sont triées selon leurs degrés ;

2. Voir Annexe B pour d'autres valeurs de ρ .

Algorithme 2 Affectation des utilisateurs aux femtocellules

Données :

- $U' \subset U$: sous-ensemble des utilisateurs non affectés,
- F_0, F_1, F_{-1} : sous-ensembles de F ,
- $U'' \subset U'$: sous-ensemble des utilisateurs non affectés détectant au moins une femtocellule dans F_0 et/ou dans F_1 .

Tant que ($U'' \neq \emptyset$) **faire**

- sélectionner $u \in U''$ tel que :

$$|Femto(u)| = \min_{u_i \in U''} |F_1 \cap Femto(u)| \text{ et } F_1 \cap Femto(u) \neq \emptyset, \text{ s'il existe}$$

sinon u est choisi aléatoirement uniforme dans U'' .

- construire A : sous-ensemble des femtocellules de F_1 détectées par u , tel que

$$A = F_1 \cap Femto(u)$$

Si $A = \emptyset$ **alors**

$$A = F_0 \cap Femto(u)$$

Si $A = \emptyset$ **alors**

- u n'est pas affecté et $Cell(u) = \emptyset$
- mettre à jour U'' : $U'' = U'' \setminus \{u\}$

Fin Si

Fin Si

- trouver $f \in A$ ayant le *maximum* d'utilisateurs dans sa zone de couverture
- affecter u et $Cell(u) = f$
- mettre à jour U'' : $U'' = U'' \setminus \{u\}$
- **Si** $U'' = \emptyset$ **alors** $U'' = U'$
- mettre à jour F_1, F_0 et F_{-1}

Fin Tant que

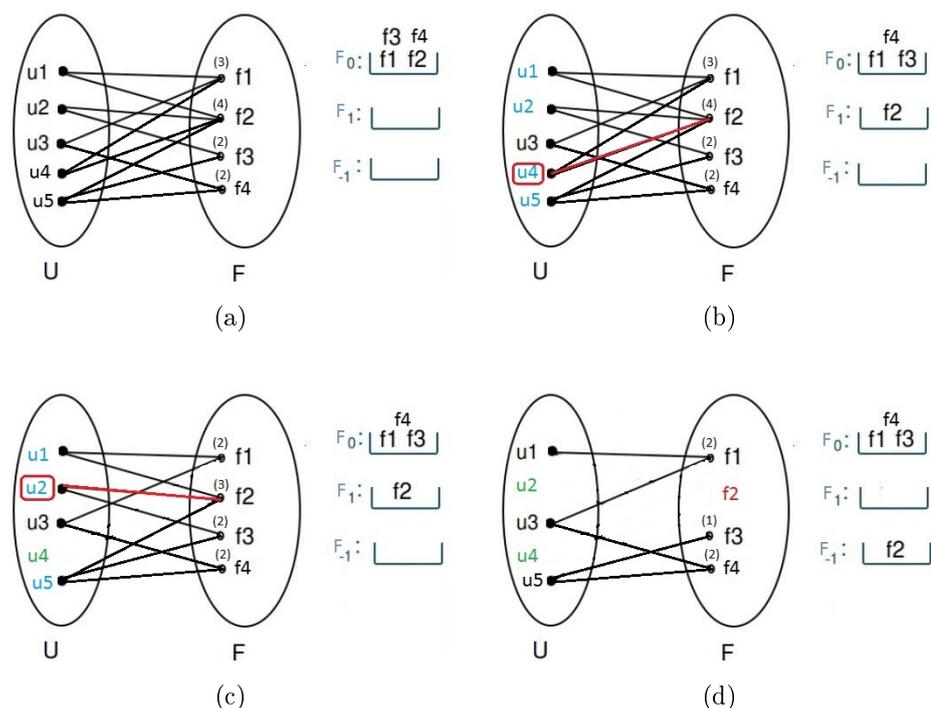


FIGURE 5.3 – Exemple d'affectation des utilisateurs aux femtocellules

- $F_1 = \{f_2\}$, 20% des femtocellules de F_0 ayant le degré maximal. Le sous-ensemble F_0 est mis à jour tel que $F_0 = \{f_1, f_3, f_4\}$.
- À la première étape d'exécution de l'algorithme d'affectation, les utilisateurs u_1, u_2, u_4 et u_5 détectent au moins une femtocellule dans F_1 qui est f_2 et une femtocellule dans F_0 . Les utilisateurs u_1, u_2 et u_4 détectent le minimum de femtocellules (égal à 2). Ainsi un utilisateur aléatoire parmi eux est sélectionné pour être affecté. Soit u_4 cet utilisateur comme présenté dans la figure 5.3b. La femtocellule de F_1 ayant le maximum d'utilisateurs dans sa zone de couverture (degré maximum dans le graphe biparti) est sélectionnée pour lui affecter l'utilisateur u_4 si sa capacité disponible permet de le servir. Dans ce cas, l'utilisateur u_4 est affecté à la femtocellule f_2 . Les degrés des femtocellules détectées par l'utilisateur u_4 sont décrémentés puisque celui-ci est affecté (voir Figure 5.3c).
- À la deuxième étape, un utilisateur parmi u_1, u_2 et u_5 qui détecte le minimum de femtocellules est sélectionné. Soit u_2 cet utilisateur, puisque u_1 et u_2 détectent le même nombre minimum de femtocellules (2). De la même façon que dans l'étape précédente, l'utilisateur u_2 est affecté à la femtocellule f_2 et les degrés des autres femtocellules sont mis à jour (voir Figure 5.3c). Les sous-ensembles F_1 et F_{-1} sont également mis à jour puisque la femtocellule f_2 est saturée, tels que $F_{-1} = \{f_2\}$ et $F_1 = \emptyset$. Afin de satisfaire la condition sur la taille du sous ensemble F_1 , ce dernier est incrémenté avec une femtocellule de F_0 ayant un degré maximal. Les femtocellules f_1 et f_4 ont le même degré minimal, ainsi $F_1 = \{f_4\}$ selon une sélection aléatoire (voir Figure 5.3d).

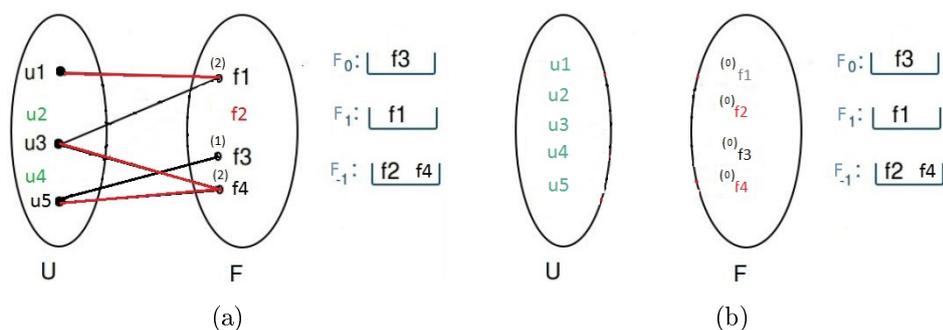


FIGURE 5.4 – Exemple d'affectation des utilisateurs aux femtocellules - suite

- De la même façon, comme présenté dans la figure 5.4a, les utilisateurs u_3 puis u_5 sont sélectionnés pour être affectés à la femtocellule f_4 . Cette dernière est saturée et les sous-ensembles sont mis à jour tels que : $F_0 = \{f_3\}$, $F_1 = \{f_1\}$ et $F_{-1} = \{f_2, f_4\}$. L'utilisateur u_1 est sélectionné à la dernière étape d'exécution de l'algorithme pour être affecté à la femtocellule f_1 .

Dans cet exemple, tous les utilisateurs sont servis par un nombre minimum de femtocellules. Le nombre de femtocellules non-saturées est minimal, étant donné le nombre d'utilisateurs présents dans le réseau. De plus, la femtocellule f_2 étant vide, sa station de base peut être désactivée afin d'économiser de l'énergie (voir Figure 5.4b).

Remarque :

D'autres critères de sélection de la femtocellule de connexion ont été considérés afin d'affecter les utilisateurs mobiles, notamment celui basé sur la capacité disponible de la femtocellule ou le ratio entre la capacité disponible et le nombre d'utilisateurs non affectés dans la zone de couverture. Comme montré dans les résultats des tests effectués qui sont présentés dans Annexe A, ces critères d'affectation des utilisateurs sont moins efficaces compte tenu de la variation de la charge du réseau et comparés au critère présenté dans ce chapitre.

Rappelons que le critère de sélection de la femtocellule de connexion adopté dans l'algorithme présenté ci-dessus est basé sur le nombre d'utilisateurs dans le voisinage de la cellule. Cela permet, comme on le verra dans la section 5.6, une meilleure efficacité face à la variation de la charge. Le critère choisi permet également une meilleure stabilité des performances lorsque la position des utilisateurs dans la zone de couverture des femtocellules change.

5.3.2 Algorithme d'affectation aux macrocellules

De la même façon que pour les femtocellules, nous proposons dans cette section un algorithme glouton qui affecte initialement les utilisateurs de l'ensemble U aux macrocellules dans l'ensemble M . L'objectif de cet algorithme est de trouver le bon compromis entre la capacité disponible des macrocellules et le nombre d'utilisateurs qu'elles servent.

Pour cela, l'algorithme repose sur le partitionnement de M en deux sous-ensembles comme suit :

- M_1 : le sous-ensemble des macrocellules non saturées ayant au moins un utilisateur non affecté dans leur zone de couverture.
- M_{-1} : le sous-ensemble des macrocellules saturées et/ou n'ayant que des utilisateurs affectés dans leur zone de couverture.

A chaque étape de l'algorithme, on considère un utilisateur $u \in U_n$ qui détecte au moins une macrocellule dans M_1 , tel que $M_1 \cap Macro(u) \neq \emptyset$. Cet utilisateur est donc affecté à une macrocellule $m \in M_1 \cap Macro(u)$ qui a le nombre *minimum* d'utilisateurs non affectés dans sa zone de couverture. Cela permet de limiter le nombre de macrocellules saturées. Notons que lorsque plusieurs macrocellules sont candidates pour servir l'utilisateur alors le choix est aléatoirement uniforme entre elles.

Si u est affecté à une macrocellule de M_1 , la capacité de cette cellule est mise à jour. Les sous-ensembles M_1 et/ou M_{-1} sont également mis à jour, si nécessaire. Lorsqu'aucun autre utilisateur ne peut encore être affecté, l'exécution de cet algorithme se termine.

Algorithme 3 Affectation des utilisateurs aux macrocellules

- 1: **Données :**
 - 2: - $U' \subset U$: ensemble des utilisateurs non affectés,
 - 3: - M_1, M_{-1} : sous-ensembles de macrocellules de M .
 - 4: **A chaque étape :**
 - 5: - sélectionner $u \in U'$ avec $M_1 \cap Macro(u) \neq \emptyset$
 - 6: - construire A : sous-ensemble de macrocellules de M_1 détectées par u , tel que
 - 7: $A = M_1 \cap Macro(u)$
 - 8: **Tant que** $(A \neq \emptyset) \& (Cell(u) = \emptyset)$ **faire**
 - 9: - trouver m ayant le *minimum* d'utilisateurs dans sa zone de couverture
 - 10: **Si** $Cap(m) \geq (Cap_{req}(u) * (1 + MinQ(u, m)))$ **alors**
 - 11: - affecter u et $Cell(u) = m$
 - 12: - mettre à jour $U' = U' \setminus \{u\}$
 - 13: - mettre à jour M_1 et M_{-1}
 - 14: **Sinon**
 - 15: - mettre à jour $A = A \setminus \{m\}$
 - 16: **Fin Si**
 - 17: **Fin Tant que**
-

5.4 Transfert de trafic pour l'équilibrage de charge

Dans cette section, nous proposons deux stratégies de transfert d'utilisateurs entre les femtocellules et les macrocellules sur lesquels seront basées les approches de contrôle

de la consommation d'énergie introduites dans la section suivante. Décharger les femtocellules vers les macrocellules qui les couvrent permet de les vider et donc de les désactiver. Cependant, décharger les macrocellules permet de réduire leur charge respective afin qu'elles consomment moins d'énergie. Pour cela, la première stratégie vise à transférer tous les utilisateurs d'une femtocellule vers les macrocellules qui la couvrent. Elle est notée *Femto-To-Macro*. La deuxième stratégie, notée *Macro-To-Femto*, transfère, au moins, un utilisateur d'une macrocellule vers une femtocellule couverte par cette macrocellule.

Ces transferts ont pour objectif de contrôler la consommation énergétique globale du réseau en équilibrant la charge entre les deux types de cellules. Nous présentons dans ce qui suit le principe de fonctionnement de chaque type de transfert.

5.4.1 Transfert en Femto-To-Macro

Lorsqu'une femtocellule f est sélectionnée pour désactiver sa station de base, ses utilisateurs sont transférés vers les macrocellules qui la couvrent. Un transfert des utilisateurs de f revient à transférer chaque utilisateur de f vers la macrocellule la plus proche de son terminal si la capacité de la macrocellule permet de satisfaire sa demande de ressources. Rappelons que la consommation énergétique d'une femtocellules saturée est la même qu'une femtocellules non-saturée on non vide également (voir Figure 2.8, page 22). Ainsi, si au moins un utilisateur ne peut pas se connecter à une macrocellule détectée (par manque de ressources), alors le transfert des utilisateurs de la femtocellule f n'est pas effectué. En effet, tous les utilisateurs de f doivent pouvoir être réaffectés à une (ou plusieurs) macrocellule dans le but de ne pas en sacrifier la connexion. Ainsi les utilisateurs d'une femtocellule f sont transférés si et seulement si :

$$\forall u \in U / Cell(u) = f, \exists m \in Mac(f), \text{ tel que } Cap(m) \geq Cap_{req}(u) \times (1 + MinQ(u, m)) \quad (5.6)$$

Rappelons que la capacité allouée à un utilisateur par une macrocellule dépend de la qualité du signal de transmission de cette dernière. La condition 5.6 est nécessaire mais pas suffisante pour vider une femtocellule f et désactiver sa station de base. En effet, le utilisateurs affectés initialement à une femtocellule f sont transférés vers les macrocellules couvrantes si, et seulement si, cela permet de réduire la consommation énergétique globale du réseau E_{Net} (voir Équation 5.5, page 76), c'est-à-dire que :

$$E_{Net} \leq E_{Net}^0 \quad (5.7)$$

E_{Net}^0 est la consommation énergétique globale du réseau avant le transfert des utilisateurs de f .

5.4.2 Transfert en Macro-To-Femto

Contrairement aux femtocellules, l'objectif de ce transfert n'est pas de vider la macrocellule. En effet, la station de base d'une macrocellules ne peut être désactivée. De plus, sa consommation énergétique est plus dépendante à sa charge que la consommation

des femtocellules (voir Figure 2.8, page 22). Pour cela, un transfert Macro-To-Femto vise à transférer le plus d'utilisateurs possible, affectés initialement à une macrocellule, vers une femtocellule f couverte par la macrocellule de connexion. Chaque transfert d'un utilisateur n'est effectué que si cela permet de réduire la consommation énergétique du réseau.

Soit u un utilisateur affecté initialement à une macrocellule m . Le sous-ensemble des femtocellules, noté F' , vers lesquelles l'utilisateur u peut être transféré est défini par : $F' = \{f; m \in Mac(f) \cap Mac(u), Fconnect(f) < Fconnect_0\}$. C'est-à-dire qu'une femtocellule $f \in F'$, si et seulement si, elle est détectée par le terminal de l'utilisateur u et est couverte par la macrocellule m . De plus, sa capacité disponible permet de satisfaire la demande en ressources de u .

Ainsi, l'utilisateur u est transféré vers une femtocellule f , si et seulement si :

$$\begin{cases} f \in F'; \text{ et} \\ E_{Net} \leq E_{Net}^0 \end{cases} \quad (5.8)$$

En effet, le transfert n'est réalisé que si la consommation énergétique globale du réseau est meilleure. Notons, que le but du transfert Macro-To-Femto n'est pas de transférer tous les utilisateurs d'une macrocellule. Chaque utilisateur transféré permet de réduire la charge de la macrocellule à laquelle il est affecté ainsi que sa consommation d'énergie.

5.5 Contrôle de la consommation d'énergie des stations de base

Dans cette section nous proposons les approches de contrôle de la consommation énergétique qui regroupent les algorithmes d'affectation des utilisateurs et les processus de transfert du trafic déjà présentés dans les section précédentes.

La consommation d'énergie d'une station de base (femto ou macro) dépend principalement de la charge de sa cellule. L'idée principale de ce travail est de gérer le trafic du réseau dans le but de contrôler sa consommation globale, en termes d'énergie.

Nous proposons dans ce chapitre deux stratégies de contrôle de la consommation énergétique selon le principe d'affectation à chaque type de cellule (femto ou macro) vu précédemment. Ces stratégies diffèrent dans la sélection du type de la cellule (femto ou macro) auxquelles les utilisateurs sont affectés en priorité durant une première phase. En effet, la première stratégie, nommée *Stratégie basée sur un transfert Femto-To-Macro (SFTM)*, contrôle en priorité la charge des femtocellules. La seconde stratégie proposée, nommée *Stratégie basée sur un transfert Macro-To-Femto (SMTF)*, contrôle en priorité la charge des macrocellules.

Sachant que les femtocellules peuvent être désactivées alors que les macrocellules doivent toujours être activées, les deux stratégies que nous proposons ont pour but de sélectionner la femtocellule à désactiver afin d'optimiser la consommation d'énergie du réseau durant une deuxième phase. Selon les stratégies (SFTM et SMTF) cette deuxième phase est basée sur le transfert des utilisateurs entre les femtocellules et les

macrocellules comme présenté dans la section précédente. On note que les utilisateurs ne sont *réellement* connectés à la cellule à laquelle ils sont affectés uniquement à la fin de la stratégie (deuxième phase). La figure 5.5 est un schéma représentatif des étapes de chaque stratégie.

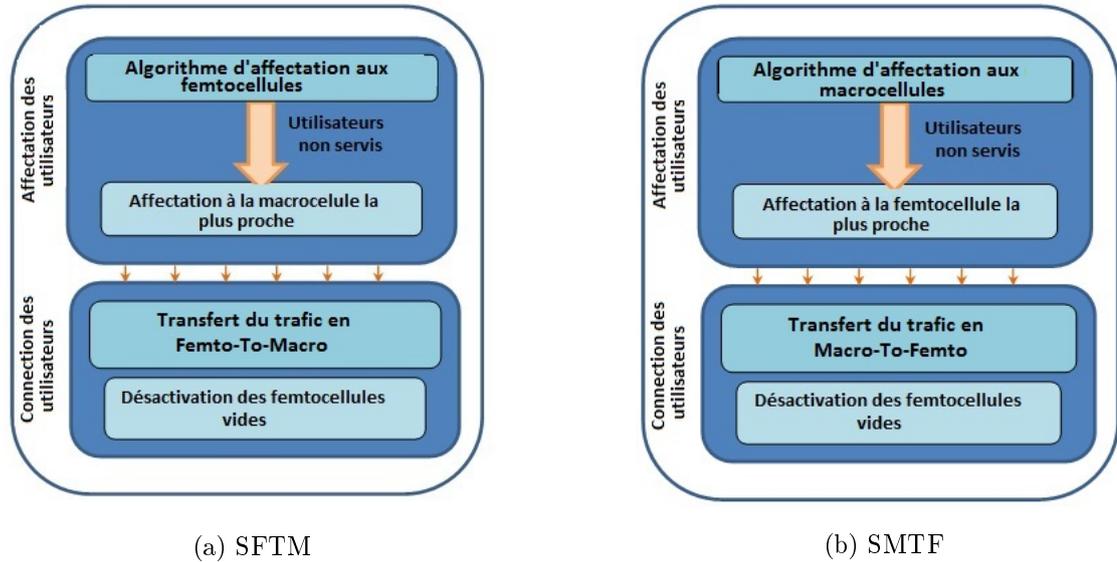


FIGURE 5.5 – Stratégies de contrôle de la consommation énergétique

5.5.1 Stratégie basée sur un transfert FTM

La première stratégie de contrôle de la consommation d'énergie que nous proposons, notée *SFTM* (*Stratégie basée sur un transfert Femto To Macro*), est basée sur la gestion d'affectation des utilisateurs aux femtocellules détectées. En effet, les utilisateurs sont affectés en priorité aux femtocellules et un transfert du trafic est réalisé depuis ces cellules vers les macrocellules qui les couvrent comme présenté dans la figure 5.5a. La stratégie consiste en deux phases consécutives. Celles-ci sont :

Phase 1

La première phase de cette stratégie est consacrée à l'affectation des utilisateurs du réseau aux cellules détectées en donnant la priorité aux femtocellules. Cette phase est elle même composée de deux étapes comme suit :

1. Initialement, les utilisateurs sont considérés pour être affectés aux femtocellules en utilisant *l'algorithme glouton d'affectation aux femtocellules* déjà défini dans la Section 5.3.1. Cette affectation respecte le principe de base des femtocellules et contrôle leur charge.

2. Lorsque cet algorithme s'arrête (les femtocellules ne peuvent plus servir d'autres utilisateurs), les utilisateurs restants (non affectés) sont affectés aux macrocellules qui les couvrent selon la qualité du signal et la consommation énergétique estimée. Étant donné U' tel que $U' \subset U$, le sous-ensemble des utilisateurs non affectés aux femtocellules (par manque de ressources ou de couverture), chaque utilisateur dans U' est affecté à une macrocellule détectée, si la capacité disponible de cette dernière permet de le servir. La macrocellule sélectionnée est celle ayant la meilleure qualité du signal de transmission. Cela correspond dans notre modèle à la macrocellule dont la station de base est la plus proche du terminal mobile de l'utilisateur. Rappelons que dans le réseau LTE, la sélection de la cellule de connexion (femto ou macro) est aussi basée sur la qualité du signal de transmission de cette dernière (voir Chapitre 3.3).

Lorsqu'aucun autre utilisateur dans U' ne peut être affecté, la seconde phase commence.

Phase 2

Cette phase est réalisée afin de contrôler la charge des femtocellules après affectation des utilisateurs en transférant ces derniers vers les macrocellules qui les couvrent, si nécessaire. Ce processus vise à vider les femtocellules quand cela est possible et est plus rentable, en termes de consommation d'énergie.

Afin de désactiver un nombre maximum de femtocellules, cette phase consiste en plusieurs itérations. A chaque itération, une femtocellule $f \in F$ est sélectionnée dans le but de transférer ses utilisateurs vers les macrocellules qui la couvrent.

La femtocellule à sélectionner en priorité pour transférer ses utilisateurs est celle qui permet la plus grande économie d'énergie si sa station de base est désactivée. La sélection d'une femtocellule procède comme suit :

- (a) Estimer le gain global en consommation d'énergie, noté \mathcal{G}_f^{FTM} , pour chaque femtocellule non vide f si son trafic est transféré selon les conditions 5.6 et 5.7 (voir Section 5.4.1). Ce gain est défini comme suit :

$$\mathcal{G}_f^{FTM} = E_{Net}^0 - \hat{E}_{Net}$$

\hat{E}_{Net} est la valeur estimée de la consommation énergétique globale du réseau lorsque f est désactivée et son trafic est transféré vers les macrocellules de $Mac(f)$. Rappelons que si au moins une des conditions 5.6 ou 5.7 n'est pas vérifiée alors les utilisateurs affectés initialement à la femtocellule ne sont pas transférés, ainsi $\mathcal{G}_f^{FTM} = 0$.

- (b) Sélectionner la femtocellule f , si elle existe, avec la meilleure économie d'énergie induite, telle que :

$$\begin{cases} \mathcal{G}_f^{FTM} = \max_{f_i \in F} \mathcal{G}_{f_i}^{FTM} \\ \mathcal{G}_f^{FTM} \neq 0 \end{cases}$$

Les utilisateurs initialement affectés à f sont donc effectivement transférés vers les macrocellules de $Mac(f)$ auxquelles ils peuvent être connectés. f est désactivée et les capacités de ces macrocellules sont mises à jour.

Le processus FTM se termine lorsqu'aucun gain (non nulle), en termes de consommation d'énergie n'est constaté, c'est-à-dire $\max_{f_i \in F} G_{f_i}^{FTM} = 0$.

5.5.2 Contrôle SMTF

La seconde approche de contrôle que nous proposons dans ce chapitre notée *SMTF* (*Stratégie basée sur un transfert Macro To Femto*) est basée sur la gestion d'affectation des utilisateurs aux macrocellules détectées. Ils sont affectés en priorité aux macrocellules, puis transférés, si nécessaire, vers les femtocellules que la macrocellule de connexion couvre. La figure 5.5b présente le principe du contrôle SMTF. Comme la stratégie précédente, SMTF consiste dans les deux phases suivantes :

- *Phase 1* : Cette phase exécute tout d'abord l'*Algorithme Glouton d'affectation aux Macrocellules* présenté dans la section 5.3.2. Lorsqu'aucun autre utilisateur ne peut être affecté à une macrocellule (par manque de ressources), cette phase affecte les utilisateurs restants aux femtocellules détectées. L'affectation des utilisateurs aux femtocellules est basée sur la qualité du signal de leurs stations de base. Ainsi, l'utilisateur est affecté à la femtocellule la plus proche de son terminal, si la capacité disponible de cette dernière le permet.
- *Phase 2* : Elle consiste à transférer les utilisateurs initialement affectés aux macrocellules vers les femtocellules non saturées comme présenté dans la section 5.4.2. L'objectif de cette phase n'est pas de vider la macrocellule sélectionnée, mais de diminuer sa charge. Par conséquent, soit $U'' \subset U$ l'ensemble des utilisateurs affectés à une macrocellule durant la première phase. L'affectation de chaque utilisateur u , aléatoirement uniforme dans U'' , est remise en cause. En effet, une femtocellule est sélectionnée dans le sous-ensemble F' afin de lui transférer l'utilisateur u . Rappelons que F' est le sous-ensemble des femtocellules détectées par le terminal de l'utilisateur u et couvertes par la macrocellule à laquelle il a été affecté initialement. Toutes les femtocellules de F' disposent d'assez de capacité pour de servir sa demande de ressources (voir Section 5.4.2).

La femtocellule sélectionnée en priorité pour recevoir l'utilisateur u est celle qui propose le meilleur gain d'énergie. Celui-ci est évalué selon la procédure suivante :

- (a) Estimer le gain global en consommation d'énergie, noté \mathcal{G}_f^{MTF} , pour chaque femtocellule f dans F' , si l'utilisateur u lui est transféré, tel que :

$$\mathcal{G}_f^{MTF} = E_{Net}^0 - \hat{E}_{Net}$$

E_{Net}^0 étant la consommation énergétique du réseau avant le transfert de u . La valeur de \hat{E}_{Net} représente la consommation énergétique estimée après transfert de l'utilisateur u .

Notons que, si la condition 5.8 n'est pas vérifiée alors l'utilisateur u n'est pas transféré vers la femtocellule f , et $\mathcal{G}_f^{MTF} = 0$.

- (b) L'utilisateur u est réaffecté à la femtocellule f offrant le meilleur gain, non nulle, si elle existe, telle que :

$$\begin{cases} \mathcal{G}_f^{MTF} = \max_{f_i \in F'} \mathcal{G}_{f_i}^{MTF} \\ \mathcal{G}_f^{MTF} > 0 \end{cases}$$

L'utilisateur u est ainsi effectivement connecté à la femtocellule sélectionnée f . Notons que, si cette dernière n'existe pas alors l'utilisateur reste connecté à la macrocellule. Les capacités des cellules concernées (macrocellule déchargée et femtocellules couvertes) sont mises à jour si nécessaire.

Le processus de transfert MTF se termine lorsque toutes les affectations des utilisateurs aux macrocellules réalisées durant la *Phase 1* sont mises à jour. Les femtocellules vides peuvent alors être désactivées.

5.6 Analyse des performances

Afin d'évaluer l'efficacité des deux stratégies de contrôle proposées *SFTM* et *SMTF*, nous comparons chacune d'entre elles avec des stratégies dans lesquelles l'affectation des utilisateurs est basée uniquement sur la qualité du signal de la station de base des cellules (femto ou macro) détectées. En effet, nous considérons deux stratégies *RFTM* et *RMTF*. Elles désignent respectivement la *stratégie Random basée sur un transfert Femto-To-Macro* et la *stratégie Random basée sur un transfert Macro-To-Femto*. Elle correspondent aux stratégies *SFTM* et *SMTF* comme suit :

RFTM : Comme la stratégie *SFTM*, cette approche est composée de deux phases successives. La seule différence entre ces deux stratégies est la sélection de la femtocellule d'affectation durant la première phase. En effet, contrairement à *SFTM*, la première phase est consacrée à l'affectation de chaque utilisateur à la cellule (femto ou macro) la plus proche avec une priorité aux femtocellules. La seconde phase de cette approche est la même que celle de *SFTM*. Les utilisateurs affectés initialement aux femtocellules activées sont transférés vers les macrocellules qui les couvrent, si cela est possible et si une économie d'énergie est constatée. Des femtocellules sont alors vidées et désactivées par la suite.

RMTF : De la même façon que dans la stratégie *SMTF*, la première phase de cette approche affecte les utilisateurs aux macrocellules en priorité. La macrocellule la plus proche du terminal de l'utilisateur est sélectionnée. Les utilisateurs non affectés, par manque de ressources, sont considérés pour une affectation à la femtocellule la plus proche de leur terminal.

La seconde phase transfère les utilisateurs affectés initialement à une macrocellule vers les femtocellules couvertes par cette dernière en revisitant l'affectation de chaque utilisateur (le même processus que dans *SMTF*).

D'autres stratégies sont considérées afin de comparer leurs performances avec celles des stratégies proposées. Nous analysons les performances d'une stratégie qui simule

l'approche utilisée par la plupart des opérateurs mobiles actuels, notée SB_1 (*Stratégie Basique 1*), ainsi que celle simulant le principe des stratégies proposées dans certains travaux de recherche antécédents, notée SB_2 (*Stratégie Basique 2*) [6][43][7]. Dans les deux stratégies SB_1 et SB_2 , aucun contrôle sur l'affectation des utilisateurs aux cellules (femto ou macro) détectées n'est appliqué. Leurs scénarios sont les suivants :

SB_1 : Nous considérons que le type (femto ou macro) de la cellule à laquelle un utilisateur sera affecté est choisi aléatoirement selon une loi uniforme. Selon ce choix, l'utilisateur est connecté en-suite à la cellule ayant la meilleure qualité du signal de transmission. Aucun contrôle de la consommation d'énergie des stations de base n'est considéré dans cette stratégie. Par conséquent, les stations de base de toutes les femtocellules sont activées même lorsqu'aucun utilisateur n'est connecté à elles. Rappelons que ce scénario simule la stratégie adoptée dans le réseau LTE (voir Sections 3.3 et 2.5).

SB_2 : Dans certains travaux de recherche, les auteurs proposent de désactiver les femtocellules vides dans les périodes de faible trafic [6][7]. Ainsi, la stratégie SB_2 est composée de deux phases. Les utilisateurs sont affectés aux cellules (femto ou macro) de la même façon que dans SB_1 durant la première phase, c'est-à-dire la cellule ayant la meilleure qualité du signal de transmission. La deuxième phase consiste à désactiver les femtocellules auxquelles aucun utilisateur n'est connecté, donc vides.

Le Tableau 5.1 résume les scénarios de toutes les stratégies considérées. On rappelle également que dans les réseaux Het-LTE actuels, le réseau principal est basé sur les stations de base de grandes cellules, c'est-à-dire macro. Les petites cellules (pico, femto,...) sont déployées afin d'aider le réseau principal à faire face à certains de ses problèmes (capacité, couverture, ...) [86]. Tandis que dans ce travail, nous considérons les stations de base des grandes et des petites cellules également dans le réseau. Toutes les approches ont été évaluées avec un intervalle de confiance de 95% ; plus de 100 observations ont été réalisées à chaque simulation.

5.6.1 Construction du réseau de couverture

Dans le but d'évaluer les performances des stratégies que nous proposons dans ce chapitre nous considérons les données réelles déjà utilisées dans le chapitre 4 (voir Section 4.4.2, page 62) [52].

Nous avons déduit l'architecture du réseau mobile à partir des rapports de l'intensité du signal reçu par les stations de base (des femtocellules et des macrocellules) lors des déplacements des clients. Nous considérons une partie du réseau qui se compose de 100 femtocellules et de 36 macrocellules. En utilisant les ensembles de données recueillies, nous avons extrait le voisinage de chaque cellule dans le réseau. Cela nous donne l'ensemble des femtocellules qui sont déployées dans la couverture de chaque macrocellule. En outre, nous supposons l'existence d'une *macrocellule parapluie*. Cette dernière peut absorber le trafic dans les zones qui ne sont pas couvertes par une macrocellule régulière.

Dans nos simulations, la capacité d'une femtocellule est de 16 utilisateurs par hypothèse [24][20]. La capacité d'une macrocellule est fixée à $14k$ unités de bloc de ressources.

Stratégie		Phase 1	Phase 2
		Affectation initiale des utilisateurs	Transfert du trafic (connexion effective)
<i>SFTM</i>		Algorithme glouton d'affectation aux femtocellules <i>puis</i> affectation des utilisateurs restants aux macrocellules les plus proches	Transfert Femto-To-Macro
<i>SMTF</i>		Algorithme glouton d'affectation aux macrocellules <i>puis</i> affectation des utilisateurs restants aux femtocellules les plus proches	Transfert Macro-To-Femto
<i>RFTM</i>		Femtocellules les plus proches, <i>puis</i> macrocellules les plus proches pour les utilisateurs restants	Transfert Femto-To-Macro
<i>RMTF</i>		Macrocellules les plus proches, <i>puis</i> femtocellules les plus proches pour les utilisateurs restants	Transfert Macro-To-Femto
SB	1	- Cellule la plus proche ; type (macro ou femto) aléatoire	∅
	2	- Cellule la plus proche ; type (macro ou femto) aléatoire + désactiver les femtocellules vides	

TABLE 5.1 – Scénarios des stratégies considérées

Tandis qu'une demande d'un utilisateur est fixée à 10 unités de bloc de ressources.

Afin de fixer les paramètres physiques des stations de base, nous nous basons sur les mesures présentées dans le tableau 2.1 (page 23). Comme déjà mentionné, la consommation énergétique des stations de base des femtocellules et des macrocellules, dépend de leur charge comme suit :

- $E_{Femto}(f) = E_{Femto}^0 + 0.8W \times Load(f)$
- $E_{Macro}(m) = E_{Macro}^0 + 188W \times Load(m)$

où $E_{femto}^0 = 9.6W$ et $E_{macro}^0 = 260W$ présentent la consommation d'énergie d'une femtocellule et d'une macrocellule vide, respectivement.

Nous observons les performances du réseau pour différents niveaux de charge. Nous faisons varier le nombre d'utilisateurs présents dans le réseau pour chaque niveau de charge. Étant donné le coût supplémentaire en ressources dû à la qualité du signal de transmission de la cellule de connexion lorsque cette dernière est une macrocellule, nous définissons deux types de charge du réseau, une *charge fondamentale* et une *charge augmentée*. La première dépend uniquement de la capacité que les cellules (femto et macro) peuvent allouer aux utilisateurs selon la demande de ces derniers. La deuxième montre l'impact de la qualité du signal de transmission des macrocellules sur la charge

globale du réseau. Nous définissons dans ce qui suit chacune des charges ainsi que la différence entre elles.

Charge fondamentale

Cette charge du réseau est définie par le ratio entre la somme des demandes et la capacité totale du réseau, telle que :

$$ChargeFondamentale = \frac{|U| \times 10}{(|M| \times MCap_0) + (|F| \times Fconnect_0 \times 10)} \quad (5.9)$$

Le facteur 10 est le nombre d'unités en termes de blocs de ressources demandées par un utilisateur.

Cette définition ne tient pas compte du coût supplémentaire dû à la qualité du signal de la station de base (selon le niveau d'amplification de puissance qui lui correspond [38]). La capacité finalement allouée par une macrocellule à un utilisateur peut être supérieure à celle requise (équation 5.4, page 74).

Charge Augmentée

Nous considérons, dans ce modèle, que la qualité du signal est aussi fonction de la distance entre le terminal de l'utilisateur et la station de base de la macrocellule. Ainsi, pour chaque utilisateur couvert par au moins une macrocellule, on prend comme hypothèse de calcul que la macrocellule la plus proche satisfera sa demande de ressources, en tenant compte du coût supplémentaire dû à la qualité du signal de transmission. Ainsi, la *charge augmentée* est définie comme le ratio entre l'estimation de la capacité allouée et la capacité totale du réseau.

La différence entre la *charge fondamentale* et la *charge augmentée* permet d'avoir un aperçu de l'impact possible de l'affectation des utilisateurs sur la charge réelle du réseau par rapport à la *charge fondamentale*. On note également que ces définitions ne tiennent pas compte de la répartition de la charge entre les cellules du réseau. La figure 5.6 présente l'évolution de la différence entre les deux charges sur la base de 200 réseaux et 50 instances pour chacun d'entre eux.

5.6.2 Résultats numériques

Afin d'évaluer l'efficacité des stratégies de contrôle de la consommation d'énergie proposées, nous observons les mesures de performance suivantes :

- la consommation d'énergie totale du réseau (équation 5.5, page 76),
- le pourcentage des stations de base des femtocellules activées,
- le pourcentage d'utilisateurs servis, autrement dit, les utilisateurs qui ont reçu la capacité minimale pour garantir leur QoS,
- le pourcentage de blocs de ressources alloués dans le réseau par les stations de base des femtocellules et macrocellules,

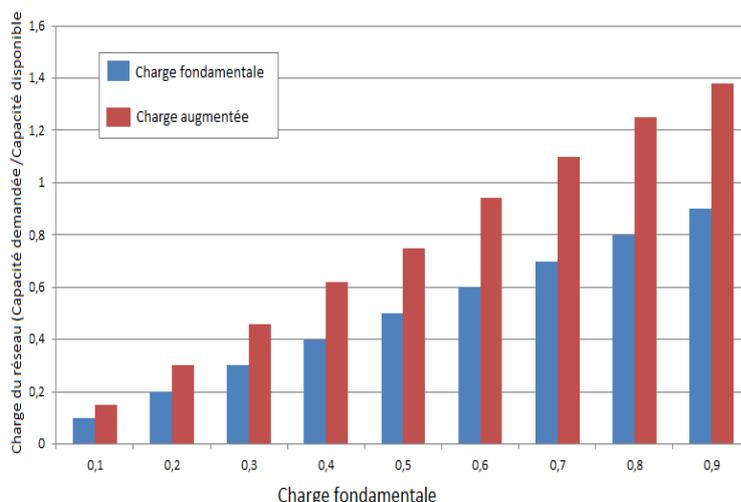


FIGURE 5.6 – L'évolution de la charge du réseau par rapport à la charge *fondamentale* et la charge *augmentée*

— l'intensité énergétique du réseau (Int). Celle-ci est définie comme la consommation d'énergie moyenne du réseau par utilisateur servi, c'est-à-dire :

$$Int = \frac{E_{Net}}{|U'|}$$

où U' est le sous-ensemble des utilisateurs servis tel que $U' \subset U$

1. *Consommation d'énergie du réseau*

La figure 5.7 présente les résultats obtenus lorsque les stratégies sont adoptées en fonction des deux charges *fondamentale* et *augmentée*. Elle montre en particulier l'importance de contrôler l'affectation des utilisateurs pour l'économie d'énergie dans les réseaux mobiles. L'absence du contrôle comme dans la première stratégie de base (SB_1) conduit à une forte consommation d'énergie. Cela est vrai pour toutes les charges du réseau.

Le simple fait de désactiver les femtocellules vides (SB_2) permet de réduire davantage la consommation d'énergie du réseau, en particulier lorsque ce dernier est faiblement chargé (une économie moyenne de 4% environ). C'est ce qui est proposé dans certains travaux de recherche ([6, 43]). Cependant, d'après la figure 5.7, il est clair que contrôler l'affectation des utilisateurs permet d'économiser encore plus d'énergie (une économie moyenne de 8% environ). En effet, un contrôle d'affectation comme dans la stratégie $SFTM$ offre une meilleure économie d'énergie du réseau quelle que soit la valeur de sa charge.

En comparant les stratégies $SFTM$ et $SMTF$, on peut voir que la première donne de meilleurs résultats quelle que soit la charge. Cependant, en diminuant la charge du réseau (*fondamentale* et donc *augmentée*), la différence entre ces deux stratégies diminue. En effet, la seconde phase des deux stratégies est basée sur équilibrage de charge.

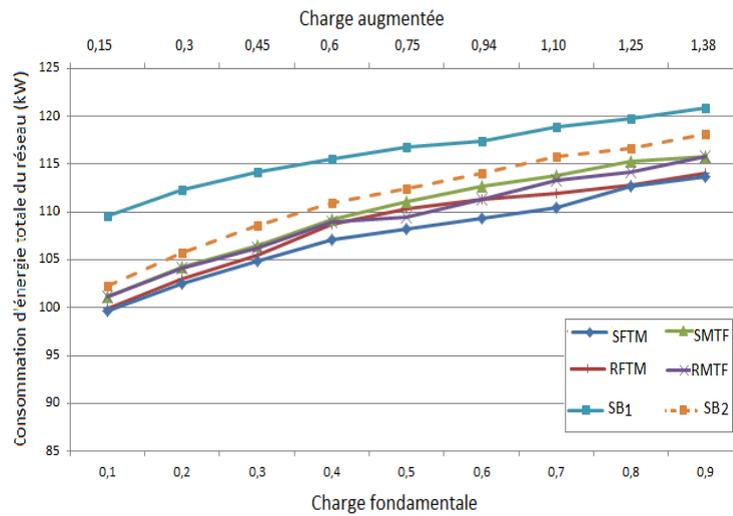


FIGURE 5.7 – Consommation d'énergie totale des stations de base du réseau

Avec *SFTM*, pour de faibles valeurs de charge, plus de femtocellules sont déchargées vers les macrocellules qui les couvrent puisque celles-ci possèdent plus de capacité.

Les stratégies *SMTF* et *RMTF* affectent les utilisateurs aux macrocellules en priorité. Sachant que les stations de base macro consomment la plus grande quantité d'énergie du réseau, cela justifie la faible économie d'énergie de ces stratégies par rapport à *SFTM* et *RFTM*. Cependant, lorsque le réseau n'est pas chargé (*charge fondamentale* ≤ 0.3), toutes les stratégies considérées, *SB₁* exclue, se comportent d'une façon assez similaire.

Pour résumer, en termes de consommation d'énergie, le fait de privilégier l'affectation des utilisateurs aux macrocellules durant la première phase, et réaliser un équilibrage de la charge durant une deuxième phase permet d'améliorer la consommation énergétique du réseau. Cela est vrai même en se basant juste sur la qualité du signal de la station de base comme critère d'affectation (tel est le cas dans *RFTM*).

2. Pourcentage des femtocellules désactivées

Comme présenté dans la figure 5.8, les stratégies qui permettent de désactiver le plus de femtocellules sont *SFTM* et *RFTM* quelle que soit la charge du réseau. Les deux stratégies contrôlent la charge des femtocellules, contrairement aux autres stratégies. La stratégie *SFTM* est basée sur l'algorithme glouton d'affectation des utilisateurs aux femtocellules. Cela permet de contrôler davantage le trafic des femtocellules et les désactiver lorsque cela est possible. Pour toutes les valeurs de la charge, les stratégies proposées dispersent le trafic à travers les cellules du réseau, ce qui permet de mieux gérer la charge de ces dernières.

Rappelons qu'aucun contrôle d'activation/désactivation des femtocellules n'est effectué dans les réseaux LTE actuels. Ainsi, toutes les stations de base des femtocellules sont activées lorsque la stratégie *SB₁* est adoptée. En observant les performances de

la stratégie SB_2 , on constate qu'elle fournit les mêmes performances que les stratégies $SMTF$ et $RMTF$. Ces dernières n'effectuent aucun contrôle de la charge des femtocellules. Il en va de même pour SB_2 .

En augmentant la charge du réseau, toutes les stratégies activent plus de femtocellules afin de satisfaire plus d'utilisateurs supplémentaires.

Les figures 5.7 et figure 5.8 prouvent également que désactiver les stations de base des femtocellules peut être un facteur clé pour l'amélioration de la consommation d'énergie du réseau comme montré par les performances des stratégies $SFTM$ et $RFTM$.

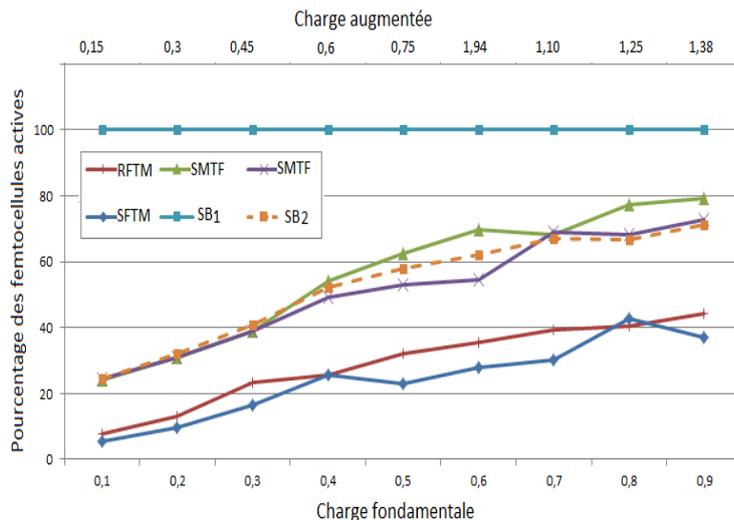


FIGURE 5.8 – Pourcentage des femtocellules activées

3. *Pourcentage des utilisateurs satisfaits et capacité totale allouée*

Les figures 5.9 et 5.10 présente le pourcentage de mobiles servis et le pourcentage de capacité allouée par rapport eux performances de la stratégies de base SB. Étant donné que SB_1 et SB_2 n'appliquent aucun contrôle d'affectation des utilisateurs, leurs performances, en termes d'utilisateurs servis et de quantité de blocs de ressources alloués, sont parfaitement similaires.

La figures 5.9 montre qu'une fois de plus les stratégies $SFTM$ et $RFTM$ sont les plus efficaces, en termes d'utilisateurs servis, lorsque le réseau est peu chargé (charge *augmentée* à moins de 60%). Elles sont suivies de près par les stratégies $SMTF$ et $RMTF$.

Lorsque le réseau est faiblement chargé (charge *augmentée* à moins de 20%), la capacité disponible permet à toutes les stratégies de servir le même nombre d'utilisateurs. Lorsque la charge du réseau augmente, la différence entre les stratégies de base (SB_1 et SB_2) et chacune des stratégies proposées ($SFTM$, $RFTM$, $SMTF$ et $RMTF$) augmente tel que ces dernières servent plus d'utilisateurs. Lorsque le réseau est extrêmement chargé ($\geq 95\%$ de charge *augmentée*), les stratégies proposées ($SFTM$, $SMTF$, $RFTM$ et $RMTF$) servent jusqu'à 15% plus d'utilisateurs que les stratégies de base SB_1 et SB_2 .

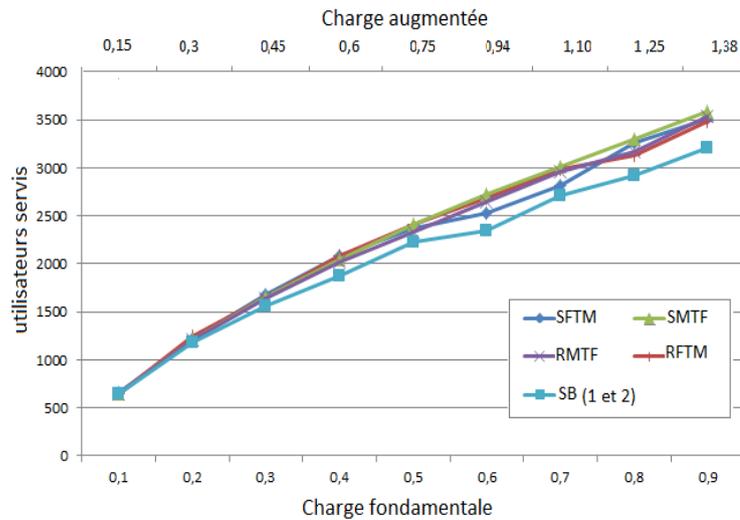


FIGURE 5.9 – Nombre d'utilisateurs servis.

On remarque clairement que l'économie énergétique que les stratégies proposées dans ce travail fournissent n'a aucun impact négatif sur le pourcentage d'utilisateurs servis et la QoS offerte. Bien au contraire, elles permettent de l'augmenter en contrôlant l'allocation des ressources dans les stations de base. En effet, la figure 5.10 montre que le facteur clé pour servir plus d'utilisateurs tout en consommant moins d'énergie est le contrôle d'affectation des utilisateurs aux cellules détectées.

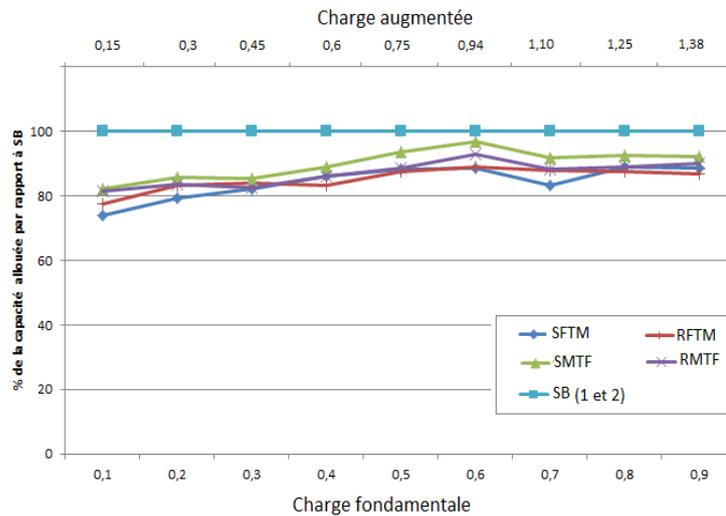


FIGURE 5.10 – Pourcentage de la capacité totale allouée par rapport à SB

A cause de l'impact de la qualité du signal sur l'allocation des ressources, des utilisateurs monopolisent plus de capacité s'ils sont connectés à une macrocellule. Considérant les stratégies *SMTF* et *RMTF*, les utilisateurs sont affectés en priorité aux macrocel-

lules, ce qui entraîne l'occupation de plus de ressources. Pour cette raison, les stratégies *SFTM* et *RFTM*, qui affectent les utilisateurs aux femtocellules en priorité, servent plus d'utilisateurs tout en allouant moins de blocs de ressources. Les figures 5.9 et 5.10 montrent que cette propriété est particulièrement vraie lorsque le réseau devient chargé (charge *augmentée* à 90%).

4. *Intensité énergétique*

La figure 5.11 présente le ratio entre les résultats de la figure 5.7 et ceux de la figure 5.9. Plus la valeur de l'intensité énergétique est petite, plus la stratégie est meilleure. C'est-à-dire que le réseau consomme moins d'énergie pour chaque utilisateur servi.

Quelle que soit la charge du réseau, les stratégies proposées dans ce chapitre (*SFTM*, *SMTF*, *RFTM* et *RMTF*) améliorent l'efficacité du réseau en contrôlant l'affectation des utilisateurs aux cellules femto et macro. En effet, ces stratégies sont plus performantes que la stratégie de base (SB_1) adoptée par les opérateurs mobiles actuels et celle proposée dans la littérature (SB_2).

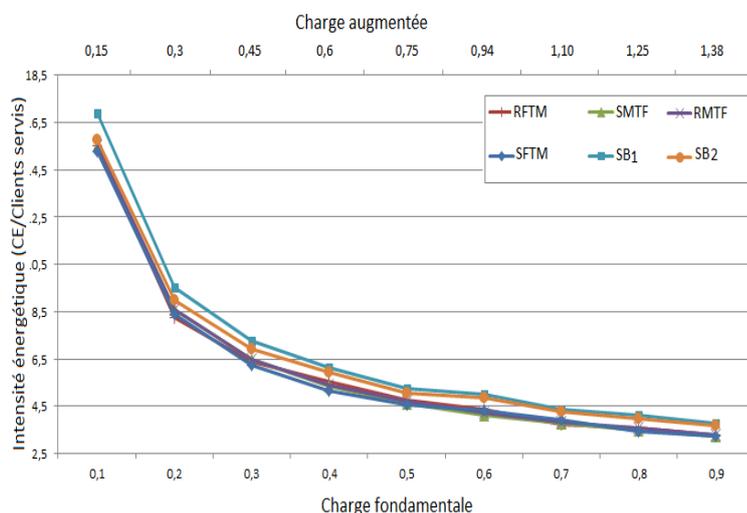


FIGURE 5.11 – Intensité énergétique du réseau

5.7 Conclusion

L'objectif principal de tout opérateur mobile est de maximiser le nombre d'utilisateurs qu'il satisfait. Pour cela, deux stratégies ont été proposées dans ce chapitre, selon la priorité d'affectation des utilisateurs. Chaque stratégie consiste en une affectation initiale des utilisateurs. Puis, les affectations sont revisitées afin de transférer les utilisateurs depuis/vers les macrocellules, si cela est plus économique en termes d'énergie. Par simulation, en utilisant une topologie réaliste d'un réseau mobile, les performances des stratégies proposées sont comparées à celles de l'approche adoptée par des opéra-

teurs mobiles actuels, ainsi qu'à celles de l'approche proposée dans certains travaux de recherche.

En contrôlant l'affectation des utilisateurs, les stratégies basées sur un transfert de trafic Femto-To-Macro (*SFTM* et *RFTM*) sont plus efficaces en termes d'énergie consommée et d'utilisateurs servis, en particulier lorsque le réseau est faiblement chargé. Cela est vrai, puisque les femtocellules, seules, peuvent gérer le trafic du réseau. Rappelons que la faible charge du réseau ne signifie pas la faible charge de toutes ses cellules. Cela dépend de la dispersion des utilisateurs dans la zone de couverture. Ces stratégies permettent de réduire la consommation énergétique des stations de base du réseau sans avoir aucun impact négatif sur la QoS offerte aux utilisateurs. Bien au contraire, plus d'utilisateurs sont servis lorsque leurs affectations aux cellules sont contrôlées. Elles permettent également un dimensionnement plus efficace grâce à la gestion d'activation/désactivation des stations de base des femtocellules.

Les stratégies proposées nécessitent une mise en œuvre centralisée et permettent un contrôle global du réseau. Cela est compatible avec les standards actuels des réseaux mobiles [15]. Dans ce chapitre, la mobilité des utilisateurs n'a pas été considérée lors de l'évaluation des performances des stratégies proposées. Cependant, la faible complexité des algorithmes proposés permet leur exécution à chaque déplacement d'un utilisateur, sous une couverture réseau de petite taille, dans le cadre d'un handover. En effet, ces stratégies peuvent être compatibles avec la mobilité des utilisateurs dans les réseaux LTE hétérogènes. Les connexions des utilisateurs sont mise à jour lorsque l'un d'entre eux se déplace dans le réseau et demande un handover. Cependant, cela risque de ne pas être équitable entre les clients. Dans le chapitre suivant, nous considérerons les contraintes de temps réel de la mobilité dans le contrôle d'affectation des utilisateurs, ainsi que l'équité entre eux afin d'économiser plus d'énergie et améliorer la QoS offerte.

Chapitre 6

Gestion d'affectation avec prise en compte de la mobilité

6.1 Introduction

L'objectif des opérateurs mobiles est de satisfaire le plus de clients en leur proposant une QoS satisfaisante. De plus, ils doivent garantir la continuité de connexion aux utilisateurs présents dans le réseau lorsqu'ils se déplacent, et cela à moindre coût énergétique.

Le modèle présenté dans le chapitre 5 permet d'améliorer la consommation énergétique globale du réseau tout en servant plus d'utilisateurs. Il est basé sur le contrôle global d'affectation des utilisateurs aux cellules détectées. Cependant, en considérant la mobilité des utilisateurs, à chaque fois qu'un mobile demande un handover la gestion globale remet en cause l'affectation de tous les utilisateurs du réseau, y compris ceux qui ne se sont pas déplacés. Cela n'est pas réaliste et ne respecte pas les contraintes temps réel de ce type de réseau hétérogène, notamment lorsque la taille du réseau est assez grande. De plus, la réaffectation d'un utilisateur qui ne s'est pas déplacé pour servir un autre ne garantit pas la conservation de la même QoS, ce qui n'est pas équitable.

Dans ce chapitre, nous proposons un contrôle local de l'affectation des utilisateurs. Cela revient à sélectionner une nouvelle cellule de connexion à l'utilisateur dont le terminal mobile demande un handover. Ce contrôle local prend en compte la mobilité des utilisateurs pour améliorer la QoS offerte tout en réduisant la consommation énergétique des stations de base des femtocellules et des macrocellules détectées.

En adaptant les stratégies de contrôle global proposées dans le chapitre précédent, nous proposons deux stratégies de contrôle local. Dans ce qui suit, nous présentons le modèle de contrôle local ainsi que les algorithmes des deux stratégies que nous proposons. Les performances d'un contrôle local sont comparées à celles d'un contrôle global de la consommation énergétique des stations de base. L'impact de la mobilité des utilisateurs est analysé lorsque le réseau adopte l'une des stratégies proposées (locales ou globales) ou garde sa stratégie de base (celle adoptée actuellement par les opérateurs mobiles).

6.2 Modèle de gestion d'affectation des mobiles

Afin de prendre en compte la mobilité des utilisateurs lors du contrôle d'affectation des utilisateurs, nous proposons une adaptation du modèle présenté dans la section 5.2. Cela permet de gérer uniquement la consommation énergétique des stations de base des cellules détectées par un utilisateur lorsqu'il se déplace.

Lorsque le terminal d'un utilisateur demande un handover (à cause d'un déplacement de l'utilisateur ou pour un équilibrage de charge), une nouvelle cellule de connexion doit être sélectionnée parmi les cellules détectées afin de garantir la continuité de sa connexion. Cette sélection dépend uniquement de la consommation énergétique ainsi que de la charge des stations de base de ces cellules.

Ainsi, la différence entre le modèle présenté dans ce chapitre et le modèle de base présenté dans le chapitre 5 est le fait d'intégrer le temps comme paramètre supplémentaire qui caractérise chaque acteur. En effet, chaque requête de handover que le terminal d'un utilisateur mobile peut effectuer est considérée comme un nouvel événement qui nécessite un contrôle de la consommation énergétique. Pour cela, nous considérons un modèle temporel discrétisé tel qu'une nouvelle étape t est associée à l'occurrence d'un événement de demande de handover d'un utilisateur u . Cela conduit à la sélection d'une nouvelle cellule de rattachement (femto ou macro) pour u .

Comme dans le modèle de base, trois acteurs principaux sont identifiés : l'utilisateur mobile, la femtocellule et la macrocellule. Ainsi, étant donné l'étape t , les paramètres qui caractérisent chacun des acteurs sont présentés dans ce qui suit.

• Utilisateur mobile

Soit u un utilisateur mobile rattaché logiquement à une femtocellule f à l'étape t . Ainsi, il est caractérisé par l'ensemble des femtocellules que son terminal détecte, noté $Femto(u, t)$, depuis sa position géographique.

A chaque étape t , il peut être connecté physiquement à une femtocellule ou à une macrocellule détectée qu'on note $Cell(u, t)$. Celle-ci peut être :

- $Cell(u, t) = f$, telle que $f \in Femto(u, t)$,
- $Cell(u, t) = m$, une macrocellule qui couvre au moins une femtocellule dans $Femto(u, t)$,
- $Cell(u, t) = \emptyset$. Le mobile n'est rattaché à aucune cellule.

Pour chaque cellule de connexion, le mobile u est caractérisé par la quantité de ressources demandée et la quantité de ressources allouée, notées respectivement $Cap_{Req}(u, t)$ et $Cap_{all}(u, t)$. Cette dernière est nulle si le mobile n'est rattaché à aucune cellule. Une quantité de ressources $Cap_{all}(u, t)$ lui est allouée selon le type de la cellule de connexion (femto ou macro). Ainsi :

- $Cap_{all}(u, t) = 0$ si $Cell(u, t) = \emptyset$; c'est-à-dire que le mobile u n'est pas connecté,
- $Cap_{all}(u, t) = Cap_{Req}(u, t)$ si la cellule de connexion est une femto,
- $Cap_{all}(u, t) = Cap_{Req}(u, t) \times (1 + MinQ(u, m))$ si la cellule de connexion est une macrocellule.

Nous rappelons que $MinQ(u, m)$ est une fonction de la distance entre le terminal mobile de u et la station de base de la macrocellule $m \in M$ (voir Section 5.2.3, page 73). En effet, la capacité qu'une cellule alloue à un mobile dépend de la capacité qu'il demande ainsi que de la qualité de signal entre son terminal mobile et la station de base de la cellule de connexion. Étant donné la faible puissance des stations de base des femtocellules, la distance entre cette dernière et un terminal mobile est négligeable.

• Femtocellule

Chaque nouvelle étape t est déclenchée par le déplacement d'un des mobiles du réseau, ce qui entraîne un changement de sa cellule logique de rattachement. Pour cela, à chaque étape t , une femtocellule f est caractérisée par l'ensemble de tous les utilisateurs présents dans sa zone de couverture, noté $CouvMob(f, t)$, ainsi que l'état On ou Off de sa station de base, noté $St(f, t)$. Elle est également caractérisée par les ensembles suivants :

- $Ulog(f, t) = \{u / f \in Femto(u, t)\}$, l'ensemble des mobiles qui sont connectés logiquement à la femtocellule f .
- $Mob(f, t) = \{u / f = Cell(u, t)\}$, l'ensemble des mobiles qui sont connectés physiquement à la femtocellule f tel que $Mob(f, t) \subseteq Ulog(f, t)$.

Comme définie dans le chapitre précédent, la capacité d'une femtocellule f est le nombre de mobiles qu'elle peut servir à l'étape t , noté $Fconnect(f, t)$. Ainsi, $0 \leq Fconnect(f, t) \leq Fconnect_0$, étant donné $Fconnect_0$ le nombre de mobiles que la station de base de f peut servir initialement.

La charge d'une femtocellule f varie dans le temps selon le nombre de mobiles servis à chaque étape. Elle est notée $Load(f, t)$ et est définie comme suit :

$$Load(f, t) = \frac{|Mob(f, t)|}{Fconnect_0} \quad (6.1)$$

On considère la consommation énergétique $E_{Femto}(f, t)$ d'une femtocellule f à l'étape t . Elle dépend de l'état de la station de base de f comme suit :

$$E_{Femto}(f, t) = \begin{cases} 0 & \text{si } St(f, t) = Off \\ \mathcal{M}_2(Load(f, t)) + E_0^{Femto} & \text{si } St(f, t) = On \end{cases}$$

\mathcal{M}_2 étant une fonction linéaire, et E_0^{Femto} la consommation d'énergie d'une femtocellule lorsqu'aucun mobile n'est connecté à sa station de base.

• Macrocellule

Comme dans le chapitre précédent, une macrocellule m est caractérisée par l'ensemble des femtocellules qu'elle couvre, noté $CouvFem(m)$, selon la topologie du réseau. Selon les mobiles connectés à sa station de base, une macrocellule m est caractérisée par la capacité totale disponible, notée $Capa(m, t)$, qu'elle peut leur allouer à chaque étape t . Nous définissons l'ensemble de ces mobiles, noté $Mob(m, t)$, par $Mob(m, t) = \{u / m = Cell(u, t)\}$. Ainsi, la macrocellule m dispose d'une charge

notée $Load(m, t)$ et consomme une quantité d'énergie notée $E_{Macro}(m, t)$. Ces deux métriques sont définies comme suit :

$$Load(m, t) = \frac{\sum_{u/Cell(u,t)=m} Cap_{all}(u, t)}{Capa(m, t)} \quad (6.2)$$

$$E_{Macro}(m, t) = \mathcal{M}_1(Load(m, t)) + E_0^{Macro} \quad (6.3)$$

La charge d'une macrocellule dépend de la capacité totale allouée aux mobiles connectés à sa station de base. Quant à sa consommation énergétique, elle dépend de la charge de m à cette étape. Rappelons que E_0^{Macro} est la consommation d'une macrocellule vide et \mathcal{M}_1 une fonction linéaire de la charge.

6.3 Contrôle local d'affectation des mobiles

Le contrôle d'affectation des utilisateurs dans un réseau hétérogène permet de limiter, en continu, la consommation énergétique des stations de base lorsque les utilisateurs mobiles présents dans le réseau se déplacent. Il permet également la gestion des ressources des stations de base des femtocellules et des macrocellules détectées par chaque mobile afin de servir plus de clients.

À l'étape t , un utilisateur u se déplace et son terminal mobile demande un handover afin d'être servi dans son nouvel emplacement. Un nouvel événement, et donc une nouvelle étape $t + 1$, est alors considéré. Dans le cadre du processus de handover, les stratégies proposées aident à sélectionner une nouvelle cellule de connexion au mobile u afin de lui garantir la continuité du service offert. Dans ce chapitre, nous nous concentrons sur le voisinage du mobile qui a déclenché cet événement, c'est-à-dire les cellules détectées par le terminal du mobile u . Pour cela, les stratégies que nous proposons ici sont dites *locales*.

Dans le but de contrôler localement la consommation énergétique des cellules (femto et macro) qui couvrent le mobile u , nous proposons deux stratégies d'affectation. Elles consistent en deux phases chacune. La première phase est consacrée à l'affectation du mobile u à une cellule qui couvre son terminal. La deuxième phase applique un équilibrage de la charge à la cellule sélectionnée initialement en remettant en cause l'affectation du mobile u .

Nous présentons dans ce qui suit les principes de sélection de la cellule de connexion. À partir de ces principes, nous présentons dans la section 6.3.2 les stratégies de contrôle local que nous proposons ainsi que leurs algorithmes.

6.3.1 Sélection de la cellule de connexion

Le contrôle d'affectation proposé dans ce chapitre est une adaptation du contrôle global présenté dans le chapitre 5. En effet, l'objectif dans ce cas est d'affecter l'utilisateur qui a demandé le handover à une cellule (femto ou macro) détectée. Comme présenté dans le chapitre précédent, un principe d'affectation est défini pour chaque type

de cellule. Ces principes sont inspirés de la dépendance de la consommation énergétique des stations de base vis-à-vis de leur charge. Ils visent à gérer l'allocation des ressources afin de réduire la consommation énergétique des stations de base (voir Section 5.3, page 74). Dans ce qui suit, nous présentons le processus de sélection d'une femtocellule, puis celui d'une macrocellule afin de servir un mobile dont le terminal demande un handover.

6.3.1.1 Sélection de la femtocellule de connexion

Le processus de sélection de la femtocellule de connexion pour un mobile u est basé sur l'algorithme glouton d'affectation des utilisateurs aux femtocellules présenté dans la section 5.3.1. Rappelons que le principe de cette affectation est de saturer le plus possible les femtocellules auxquelles au moins un mobile est déjà connecté. Ce principe est lié au fait que la dépendance de la consommation énergétique des femtocellules par rapport à leur charge est négligeable (voir Figure 2.8).

Ainsi, le but de ce processus est d'affecter un mobile u , lorsqu'il demande un handover, à une femtocellule $f \in Femto(u, t)$ non vide en priorité. Cette femtocellule n'est sélectionnée que si sa capacité disponible permet de servir la demande de u , autrement dit si f n'est pas saturée (voir Section 5.3). Le mobile u est donc affecté à la femtocellule qui maximise le nombre de mobiles dans sa zone de couverture.

Dans le cas où plusieurs femtocellules détectées peuvent être sélectionnées pour servir le mobile u , la femtocellule choisie est celle qui permet de minimiser le nombre de femtocellules non saturées, c'est-à-dire la cellule qui a le nombre maximal de mobiles déjà connectés à sa station de base. Cette femtocellule peut être potentiellement saturée en connectant u à sa station de base.

Si le mobile u n'est couvert que par des femtocellules désactivées, alors celle qui maximise le nombre de mobiles dans sa zone de couverture est réactivée afin d'affecter u à sa station de base. Ainsi, la capacité de la femtocellule sélectionnée est mise à jour.

Remarque : Lorsque la cellule de connexion de l'étape précédente, soit $Cell(u, t - 1) = f'$, est détectée à l'étape t , c'est-à-dire que $f' \in Femto(u, t)$, le mobile u peut être réaffecté à la cellule f' à l'étape t (si elle n'a pas été sélectionnée initialement). Cette affectation n'est possible que si, et seulement si, cela permet de réduire la consommation énergétique du réseau. Cela permet au processus de sélection de limiter la réactivation des femtocellules désactivées pour servir le mobile u .

Le processus de sélection de la femtocellule de connexion se termine avec succès lorsque le mobile u est servi par la station de base d'une femtocellule $f \in Femto(u, t)$. Cependant, si le mobile u n'est couvert que par des femtocellules saturées alors sa demande ne peut être satisfaite et ce processus se termine avec un échec.

6.3.1.2 Sélection de la macrocellule de connexion

Dans le but d'affecter un mobile à une macrocellule détectée, nous considérons la consommation énergétique de cette dernière. Contrairement aux femtocellules, la

consommation d'une macrocellule est plus sensible à la capacité qu'elle alloue aux mobiles connectés à sa station de base, notamment, lorsque le coût supplémentaire dû à la qualité du signal est considéré.

Lorsque le terminal d'un mobile u qui se déplace demande un handover, une nouvelle étape t est considérée. Le processus de sélection de la macrocellule de connexion consiste à l'affecter à une macrocellule m qui dispose d'assez de capacité pour servir sa demande de ressources. Soit M_1 le sous-ensemble des macrocellules détectées par le terminal du mobile u , tel que $M_1 \subseteq Macro(u, t)$. Chacune de ces macrocellules possède une capacité disponible suffisante pour servir la demande de ressources de u en tenant compte du coût supplémentaire dû à la qualité du signal de transmission de sa station de base. La macrocellule m sélectionnée est celle qui consomme le moins d'énergie parmi les macrocellules de M_1 lorsque le mobile u est affecté à sa station de base. D'une façon formelle, soit $E_{Net}(t)|_{Cell(u,t)=m}$ le coût énergétique du réseau lorsque le mobile u est affecté à m . Cette dernière est sélectionnée si et seulement si :

$$E_{Net}(t) |_{Cell(u,t)=m} = \min_{m_i \in M_1} E_{Net}(t) |_{Cell(u,t)=m_i}$$

Remarque : Nous rappelons que la macrocellule m qui consomme le moins d'énergie n'est pas forcément celle qui a la meilleure qualité du signal de transmission. La sélection d'une macrocellule dépend de sa charge avant de servir la demande du mobile u .

6.3.2 Stratégies de contrôle local d'affectation

Afin de réduire localement la consommation énergétique des stations de base, nous proposons deux stratégies d'affectation des utilisateurs mobiles (Figures 6.1). La différence entre les deux stratégies (Figure 6.1a et Figure 6.1b) est dans le type (femto ou macro) de la cellule sélectionnée et à laquelle le mobile est affecté initialement.

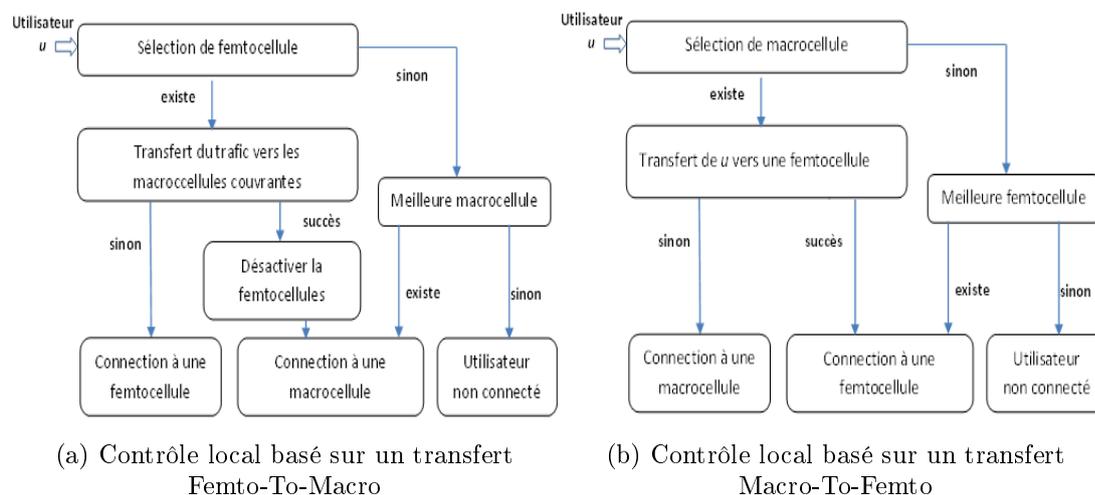


FIGURE 6.1 – Stratégies de contrôle local d'affectation des utilisateurs

Basée sur les stratégies proposées dans le chapitre 5, la première stratégie de contrôle local attribue une priorité aux femtocellules afin de contrôler l'affectation des mobiles aux femtocellules détectées. Elle est basée sur un principe de transfert de trafic Femto-To-Macro. La deuxième stratégie attribue une priorité aux macrocellules et vise à contrôler l'affectation des mobiles aux macrocellules détectées. Elle est basée sur un transfert de trafic Macro-To-Femto.

Ces stratégies sont appliquées à chaque nouvelle étape t . C'est-à-dire, qu'à chaque nouveau déplacement d'un mobile u , ces stratégies réaffectent ce dernier à une cellule (femto ou macro) qui offre la meilleure économie d'énergie. Notons que dans certains cas, l'affectation du mobile u peut avoir un impact sur l'affectation initiale de certains utilisateurs présents dans la même zone de couverture.

Dans les sections suivantes nous présentons en détails le fonctionnement de chacune des stratégies ainsi que leurs algorithmes.

6.3.2.1 Contrôle local basé sur un transfert Femto-To-Macro

Cette stratégie vise à affecter, à une étape t , un mobile u dont le terminal demande un handover (voir Figure 6.1a). L'algorithme qui correspond à ce contrôle local est noté *LFTM* (*contrôle Local basé sur un transfert Femto-To-Macro*). Il est constitué des deux phases suivantes :

- *Phase 1* : Cette phase sélectionne une femtocellule à laquelle le mobile u sera affecté selon le processus de sélection présenté dans la section 6.3.1.1. Si le mobile u n'est pas affecté à une femtocellule (échec du processus de sélection) alors la macrocellule dont la station de base est la plus proche servira le mobile u si sa capacité disponible le permet. La qualité du signal est donc prise en compte lors de l'allocation des ressources pour le mobile u . Notons que si ce dernier est affecté à une macrocellule durant cette phase alors l'algorithme *LFTM* se termine sans exécuter la phase 2 qui est consacrée à l'équilibrage de la charge.
- *Phase 2* : Cette phase est considérée uniquement si le mobile u qui se déplace est initialement affecté à une femtocellule f durant la première phase. Comme présenté dans la section 5.4.1, tous les mobiles connectés à la station de base de la femtocellule f (mobile u compris) sont transférés aux macrocellules qui la couvrent (transfert Femto-To-Macro). Rappelons que ce transfert est réalisé si, et seulement si, une économie d'énergie peut être réalisée suite à ce transfert de trafic.

Ainsi, le succès de l'algorithme *LFTM* dépend du résultat de la phase initiale d'affectation du mobile u (Phase 1).

6.3.2.2 Contrôle local basé sur un transfert Macro-To-Femto

D'une façon similaire à la stratégie précédente, ce contrôle local est basé sur un transfert de trafic Macro-To-Femto et vise à gérer l'affectation des mobiles aux macrocellules lorsqu'ils demandent un handover (voir Figure 6.1b).

Algorithme 4 LFTM

```

1: Procedure (mobile  $u$ )
2:   - sélectionner  $f \in Femto(u, t)$  selon le processus de sélection de la femto-
   cellule de connexion
3:   Si échec alors
4:     - affecter  $u$  à la macrocellule  $m \in Macro(u, t)$  la plus proche
5:     Si affectation à la macrocellule avec succès alors
6:       -  $u$  est connecté à  $m$ 
7:     Sinon
8:       -  $u$  n'est pas servi
9:     Fin Si
10:  Sinon
11:   - transfert de la charge de  $f$  en FTM (si gain énergétique)
12:   Si transfert réussi alors
13:     -  $u$  est connecté à une macrocellule qui couvre  $f$ 
14:   Sinon
15:     -  $u$  est servi par  $f$ 
16:   Fin Si
17: Fin Si
18: Fin Procedure

```

A une étape t et suite au déplacement d'un mobile u , l'algorithme qui correspond à ce contrôle, noté *LMTF* (*contrôle Local basé sur un transfert Macro-To-Femto*), exécute les deux phases suivantes :

- *Phase 1* : Cette phase sélectionne la macrocellule à laquelle le mobile u est affecté selon le processus de sélection défini dans la section 6.3.1.2. Dans le cas où ce processus se termine par un échec, la femtocellule f dont la station de base est la plus proche du mobile u est sélectionnée pour servir sa demande de ressource si elle n'est pas saturée.

Si le mobile u est affecté à une cellule (femto ou macro), l'algorithme *LMTF* se termine avec succès. Cela est vrai puisque la phase suivante sert à équilibrer la charge des cellules concernées (cellule de connexion et cellules voisines). Sinon, l'algorithme se termine par un échec et le mobile u ne sera définitivement pas servi durant cette étape.

- *Phase 2* : Elle est considérée uniquement lorsque le mobile u est affecté à une macrocellule m lors de la première phase.

Dans ce cas, la macrocellule de connexion m est considérée pour un éventuel transfert de trafic Macro-To-Femto (voir Section 5.4.2, page 83). Rappelons que la station de base d'une macrocellule ne peut être désactivée. De plus, sa consommation énergétique dépend fortement de sa charge (voir Section 2.5, page 21). Pour cela, le but de cette phase n'est pas de vider la macrocellule des utilisateurs connectés à sa station de base. Pour chaque mobile transféré, la consommation

énergétique de la station de base est réduite. Ainsi, afin d'assurer une équité entre les mobiles connectés à la macrocellule m , nous proposons de transférer le mobile u uniquement. C'est un contrôle local. Le transfert de u vers une femtocellule f est possible si et seulement si la condition 5.8 (page 84) est respectée, c'est-à-dire lorsque f est couverte par la macrocellule sélectionnée initialement et est détectée par le terminal du mobile u à l'étape t . De plus, la capacité de cette femtocellule f permet de satisfaire la demande de ressources du mobile u tout en offrant une meilleure économie d'énergie à cette étape. D'une façon similaire à la stratégie *SMTF* présentée dans la section 5.5.2, le gain en consommation d'énergie $\mathcal{G}_f^{MTF}(t)$ pour chacune des femtocellules potentielles f est estimé comme suit :

$$\mathcal{G}_f^{MTF}(t) = E_{Net}^0(t) - \hat{E}_{Net}(t)$$

$E_{Net}^0(t)$ et $\hat{E}_{Net}(t)$ sont respectivement le coût énergétique du réseau à l'étape t avant et après le transfert du mobile u vers la femtocellule f . Ce mobile est donc réaffecté à la femtocellule f offrant le meilleur gain, non nulle, si elle existe. C'est-à-dire :

$$\begin{cases} \mathcal{G}_f^{MTF}(t) = \max_{f_i \in F'} \mathcal{G}_{f_i}^{MTF}(t) \\ \mathcal{G}_f^{MTF}(t) > 0 \end{cases}$$

F' est le sous-ensemble des femtocellules vers lesquelles le mobile u peut être transféré (voir Section 5.4.2). Ce mobile est alors connecté à la station de base de la femtocellule sélectionnée f . Les capacités disponibles des cellules concernées sont mises à jour.

Pour résumer, chacune des stratégies proposées dans cette section permet d'affecter un mobile lorsque son terminal demande un handover en sélectionnant une nouvelle cellule pour le servir. Cette sélection dépend de la priorité attribuée au type de cellule (femto ou macro) dans chacune des stratégies.

6.4 Analyse des performances

Dans le but d'évaluer l'efficacité des algorithmes de contrôle local *LFTM* et *LMTF*, nous comparons leurs performances à celles de la stratégie basique *SB* qui correspond à *SB₁* vue dans le chapitre 5 (page 88). Les performances des algorithmes *LFTM* et *LMTF* sont également comparées à celles des stratégies de contrôle global *SFTM* et *SMTF* proposées dans le chapitre 5. Nous présentons dans ce qui suit les scénarios utilisés dans le cadre de la mobilité avant de présenter et de discuter les résultats numériques obtenus.

6.4.1 Scénarios de comparaison

Les stratégies *SB*, *SFTM* et *SMTF* ne considèrent pas la mobilité des utilisateurs. Pour cela, nous présentons d'abord les scénarios d'exécution de ces stratégies dans le cadre de la mobilité afin de les comparer aux stratégies *LFTM* et *LMTF*.

Algorithme 5 LMTF

```
1: Procedure (mobile  $u$ )
2:   - sélectionner  $m \in Macro(u, t)$  selon le processus de sélection de la ma-
   crocellule de connexion
3:   Si échec alors
4:     - affecter  $u$  à la femtocellule  $f \in Femto(u, t)$  la plus proche
5:     Si affectation à la femtocellule avec succès alors
6:       -  $u$  est connecté à  $f$ 
7:     Sinon
8:       -  $u$  n'est pas servi
9:     Fin Si
10:  Sinon
11:    - transférer  $u$  vers une femtocellule selon un processus MTF (si gain
    énergétique)
12:    Si transfert réussi alors
13:      -  $u$  est servi par une femtocellule couverte par  $m$ 
14:    Sinon
15:      -  $u$  est servi par  $m$ 
16:    Fin Si
17:  Fin Si
18: Fin Procedure
```

6.4.1.1 Scénario de la stratégie basique

Lorsqu'un mobile u se déplace et son terminal demande un handover, l'algorithme de SB décide aléatoirement du type de la cellule de connexion (femto ou macro) selon une loi uniforme. Selon le type de cellule sélectionné et parmi les cellules détectées, la femtocellule ou la macrocellule offrant la meilleure qualité du signal de transmission est sélectionnée pour servir le mobile u . Si la capacité disponible de la cellule sélectionnée ne permet pas de satisfaire la demande du mobile alors ce dernier n'est pas servi. Rappelons que SB simule la stratégie adoptée actuellement par les opérateurs mobiles dans les réseaux LTE.

6.4.1.2 Scénarios des stratégies de contrôle global

Les stratégies de contrôle global visent à réduire la consommation énergétique du réseau mobile en prenant en compte tous les emplacements des utilisateurs.

Le principe d'affectation des utilisateurs dans un contrôle global est basé sur les algorithmes gloutons (voir Chapitre 5). Ces derniers sont de faible complexité et permettent la gestion d'affectation des utilisateurs lorsqu'ils sont mobiles. Ainsi, en prenant en considération la mobilité des utilisateurs, les algorithmes de $SFTM$ et $SMTF$ consistent en deux phases chacun.

A l'étape t , la première phase revient à remettre en cause les affectation de tous

les utilisateurs y compris le mobile qui demande le handover. Le mobile à affecter en priorité est celui qui minimise le nombre de cellules (femtocellules pour le *SFTM* et macrocellules pour le *SMTF*) détectées.

La deuxième phase est consacrée à l'équilibrage de la charge entre les femtocellules et les macrocellules afin de réduire la consommation énergétique des stations de base et désactiver les femtocellules vides.

- **Scénario de *SFTM*** : lorsque cette stratégie est adoptée, le mobile sélectionné est affecté à une des femtocellules ayant le nombre maximum d'utilisateurs non servis dans sa zone de couverture. Si aucune femtocellule ne peut le servir par manque de capacité alors il est affecté à la macrocellule qui offre la meilleure qualité de signal de transmission. Cette affectation n'est réalisée que si la capacité disponible de la macrocellule le permet tout en considérant le coût supplémentaire engendré par la qualité du signal. La deuxième phase de la stratégie *SFTM* réalise un équilibrage de charge de toutes les femtocellules actives. Comme présenté dans la section 5.5.1, les mobiles affectés initialement à des femtocellules sont transférés vers les macrocellules qui les couvrent si cela est plus économique, en termes d'énergie.

- **Scénario de *SMTF*** : lorsque cette stratégie est adoptée, le mobile sélectionné est affecté à une des macrocellules ayant le nombre minimum d'utilisateurs non servis dans sa zone de couverture. Si cette macrocellule n'existe pas (par manque de capacité), alors le mobile sélectionné est affecté à la femtocellule avec la meilleure qualité du signal de transmission. Durant la deuxième phase de cette stratégie, l'affectation de tous les mobiles servis initialement par une macrocellule est revisitée. Ils sont transférés vers les femtocellules couvertes par la macrocellule de connexion afin de réduire la consommation énergétique du réseau.

Par conséquent, contrairement aux stratégies de contrôle local, les stratégies de contrôle global d'affectation des mobiles sont conçues pour remettre en cause la connexion de tous les utilisateurs à chaque nouvelle demande de handover par l'un des mobiles. Cela semble irréaliste à cause des contraintes temps réel du réseau (vitesse de déplacement, tailles des cellules, ...). Cette mise à jour a pour but de contrôler globalement l'affectation des utilisateurs ainsi que la consommation énergétique du réseau. Tandis que les stratégies de contrôle local visent à affecter uniquement le mobile qui se déplace et dont le terminal demande un handover. De plus, la gestion de la consommation énergétique concerne seulement les stations de base des cellules détectées par le mobile.

Le tableau 6.1 résume les scénarios considérés dans les simulations réalisées ainsi que leurs principes de fonctionnement. Toutes les stratégies sont évaluées en utilisant le réseau de couverture présenté dans la section 5.6.1 (page 89). Le niveau de confiance des résultats obtenus est de 95%. Pour cela, nous générons des utilisateurs mobiles afin d'atteindre une charge fondamentale du réseau que nous faisons varier (voir Section 5.6.1).

Stratégies	Phase 1	Phase 2
	Affectation initiale du mobile	Transfert (connexion)
<i>LFTM</i>	Sélection d'une femtocellule sinon la macrocellule la plus proche	Vider la femtocellule sélectionnée en FTM
<i>LMTF</i>	Sélection d'une macrocellule sinon la femtocellule la plus proche	Transfert du mobile en MTF
<i>SFTM</i>	Algorithme glouton d'affectation aux femtocellules (réaffectation de tous les utilisateurs) puis réaffecter les utilisateurs restants aux macrocellules les plus proches	Vider les femtocellules en FTM
<i>SMTF</i>	Algorithme glouton d'affectation aux macrocellules (réaffectation de tous les utilisateurs) puis réaffecter les utilisateurs restants aux femtocellules les plus proches	Transfert des utilisateurs en MTF
SB	Sélectionner la cellule la plus proche ; type (macro ou femto) aléatoire	∅

TABLE 6.1 – Scénarios des stratégies considérées

Initialement, tous les utilisateurs sont considérés pour être servis selon les stratégies de contrôle global *SFTM* et *SMTF*. Nous considérons 200 mouvements consécutifs (événements). Chaque événement t , tel que $1 \leq t \leq 200$, est engendré par le déplacement d'un mobile u sélectionné aléatoirement et dont le terminal demande un handover. Une nouvelle femtocellule logique est sélectionnée pour rattacher (logiquement) le mobile u . Cette femtocellule est sélectionnée aléatoirement parmi les cellules voisines de la femtocellule logique à laquelle le mobile était rattaché (logiquement) à l'étape $t - 1$.

L'algorithme de chaque stratégie de contrôle global (*SFTM* et *SMTF*), de contrôle local (*LFTM* et *LMTF*) ou de la stratégie basique (*SB*) est exécuté afin de servir le mobile u et le connecter à une femtocellule ou à une macrocellule du réseau.

6.4.2 Résultats numériques

Les mesures de performances observées pour analyser l'efficacité du contrôle local d'affectation des mobiles sont les suivantes :

- la consommation énergétique totale du réseau,
- le pourcentage de femtocellules actives,
- le pourcentage de mobiles servis,
- le pourcentage de la capacité totale allouée par les cellules (femto et macro) aux mobiles servis,
- l'intensité énergétique du réseau, qui est définie comme le ratio entre la consommation d'énergie globale du réseau et le nombre de mobiles servis.

Nous observons les moyennes de chacune des mesures considérées afin d'évaluer l'impact de la mobilité sur le contrôle global et le contrôle local. Nous nous concentrons sur la charge fondamentale (voir Section 5.6.1, page 89). Ainsi, les figures présentées par la suite montrent l'évolution de chaque mesure en fonction de la charge fondamentale totale du réseau, que nous désignerons par *charge*.

- La figure 6.2 montre les résultats obtenus pour les stratégies considérées lorsqu'un mobile choisi aléatoirement se déplace. En particulier, elle montre l'importance de contrôler l'affectation des utilisateurs pour réduire la consommation énergétique des stations de base (localement et globalement). La réduction est de 11% en moyenne par rapport à la stratégie actuelle des opérateurs mobiles (*SB*). Lorsque cette dernière est adoptée, les stations de base consomment plus d'énergie, quelle que soit leur charge.

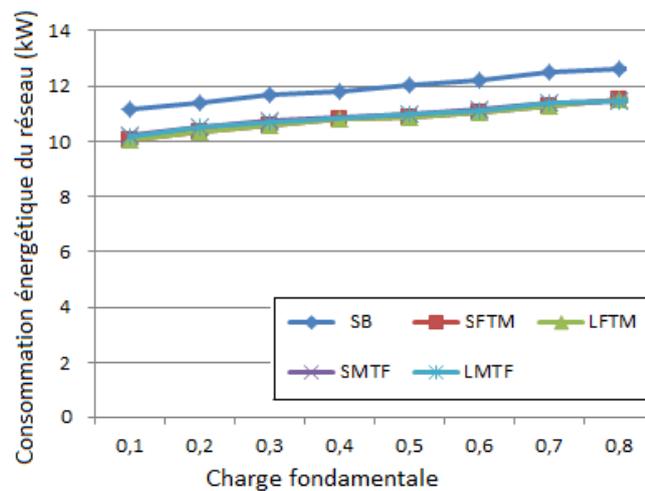


FIGURE 6.2 – Consommation énergétique du réseau

En comparant les stratégies de contrôle local et global (*SFTM* vs *LFTM* et *SMTF* vs *LMTF*), on remarque que leurs courbes sont presque superposées. Elles permettent la même économie d'énergie. En effet, la mobilité des utilisateurs n'impacte pas l'économie d'énergie réalisée par le contrôle (local ou global) d'affectation des mobiles de ces stratégies. Lorsque le réseau est faiblement chargé (charge inférieure à 50%), les stratégies basées sur un équilibrage de la charge *FTM* (local et global) permettent aux stations de base de consommer moins d'énergie que les stratégies basées sur un équilibrage *MTF*. Cependant, lorsque la charge du réseau augmente, les performances de *SFTM* diminuent légèrement par rapport à celles de *LFTM*. En effet, ces stratégies visent à affecter les mobiles aux femtocellules en priorité. De plus, étant donné que les femtocellules sont moins sensibles à la charge comparées aux macrocellules, leur capacité est limitée. Ainsi, plus de mobiles sont affectés aux macrocellules.

Au final, le contrôle local d'affectation des mobiles offre la même économie d'énergie que le contrôle global quelle que soit la charge du réseau.

- En considérant le pourcentage des femtocellules actives, la figure 6.3 montre que les stratégies de contrôle local (*LFTM* et *LMTF*) permettent de désactiver le maximum de femtocellules, comparées aux stratégies de contrôle global correspondantes (*SFTM* et *SMTF*). Étant donné qu'aucune gestion d'activation ou de désactivation des femtocellules n'est considérée dans les réseaux LTE hétérogènes actuels, toutes les femtocellules sont actives lorsque la stratégie *SB* est adoptée.

Les stratégies *LFTM* et *SFTM* contrôlent l'affectation des mobiles aux femtocellules, ce qui permet de gérer la désactivation des stations de base de plus de femtocellules lorsqu'elles sont vides. Cela est vrai quelle que soit la charge du réseau. En comparant ces deux stratégies, nous remarquons qu'elles offrent (presque) les mêmes performances pour de faibles valeurs de la charge. En augmentant le nombre de mobiles dans le réseau (charge supérieure à 40%), le contrôle local conduit à une activation plus importante des femtocellules que le contrôle global. Effectivement, le contrôle dans la stratégie *LFTM* est réduit à la femtocellule à laquelle le mobile est affecté. Tandis que, le contrôle dans la stratégie *SFTM* remet en cause la désactivation de toutes les femtocellules du réseau y compris celle que le mobile vient de quitter.

Exemple : Le mobile u est connecté à une cellule f_{t-1} . Après déplacement et demande d'un handover, il est affecté à une femtocellule f_t . L'algorithme *LFTM* gère la désactivation de la femtocellule de connexion actuelle, donc f_t . L'algorithme *SFTM* gère la désactivation des femtocellules dans F , y compris f_{t-1} et f_t .

Concernant les stratégies basées sur un transfert d'utilisateurs en *MTF* (*LMTF* et *SMTF*), elles contrôlent l'affectation des mobiles aux macrocellules. Contrairement aux stratégies *LFTM* et *SFTM*, aucun contrôle d'affectation aux femtocellules n'est appliqué. Cela justifie que les stratégies *LMTF* et *SMTF* activent plus de femtocellules que les autres stratégies proposées (*LFTM* et *SFTM*). La stratégie *SMTF* remet en cause l'affectation initiale de tous les mobiles et les connecte à des femtocellules en les réactivant si cela est plus économique en termes d'énergie. Contrairement à la stratégie *LMTF* qui réactive au plus une seule femtocellule (si besoin) afin de réaffecter le mobile qui a demandé le handover.

Encore une fois, d'après les figures 6.2 et 6.3, la désactivation des femtocellules n'est pas le facteur clé pour une consommation énergétique plus économique. Cela vient confirmer les résultats obtenus dans le chapitre précédent dans lequel la mobilité des utilisateurs n'était pas considérée. Ces résultats contredisent les hypothèses des travaux dans la littérature (voir Section 2.5, page 21). En effet, la stratégie *LMTF* active plus de femtocellules en consommant moins d'énergie lorsque le réseau est chargé.

- En termes de mobile servis, la figure 6.4 montre le nombre de mobiles servis lorsque chacune des stratégies proposée est adoptée. Le contrôle (local et global) d'affectation des mobiles permet de servir jusqu'à 45% plus de mobiles (28% en moyenne) que la stratégie basique. Cela est vrai tout en allouant moins de ressources, comme le montre la figure 6.5.

Lorsque les stratégies de contrôle local (*LFTM* et *LMTF*) sont adoptées, le pour-

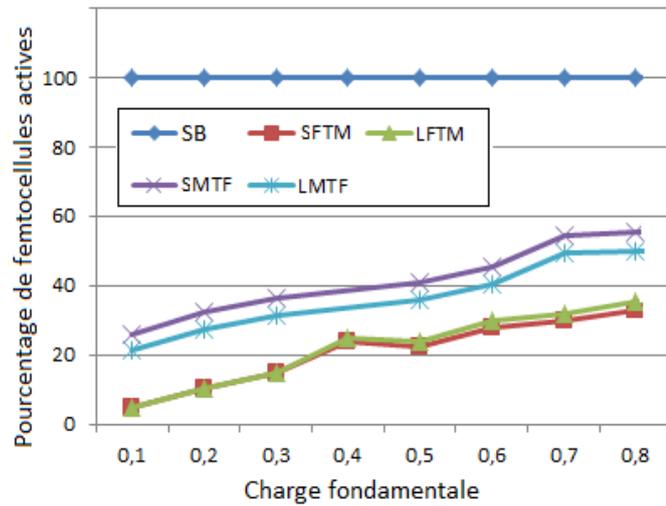


FIGURE 6.3 – Pourcentage des femtocellules activées

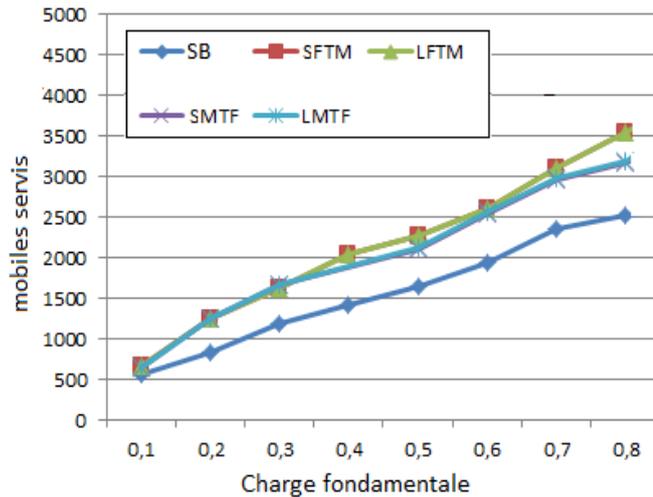


FIGURE 6.4 – Nombre mobiles servis en fonction de la charge du réseau

centage de mobiles servis ainsi que la capacité totale allouée sont les mêmes que quand les stratégies de contrôle global sont adoptées, notamment lorsque le réseau est légèrement chargé (charge inférieure à 50%). Les stratégies *LFTM* et *SFTM* servent plus de mobiles lorsque leur nombre augmente (charge élevée). Cela est vrai étant donnée que le trafic est concentré dans les femtocellules en priorité. En effet, les stratégies proposées (*LMTF*, *SMTF*, *LFTM* et *SFTM*) sont plus robustes face à la variation de la charge du réseau et servent plus de mobiles tout en allouant moins de ressources comparées aux performances de la stratégie basique.

- Afin d'évaluer l'efficacité générale des stratégies que nous proposons dans ce

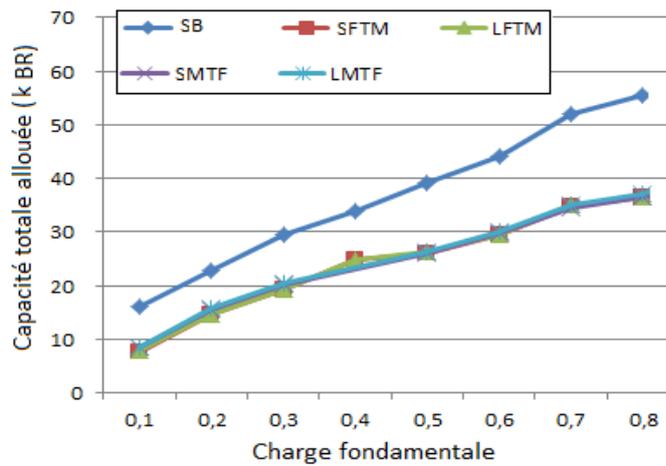


FIGURE 6.5 – Capacité totale allouée pour les mobiles servis

chapitre, nous présentons dans la figure 6.6 l'intensité énergétique du réseau. Cette mesure montre la consommation d'énergie totale du réseau pour chaque mobile servi. Le but de chaque contrôle est de réduire cette mesure.

Les stratégies de contrôle local et global basées sur un transfert d'utilisateurs *FTM* sont en moyenne plus performantes. En général, le contrôle d'affectation des mobiles est plus efficace quelle que soit la charge du réseau.

D'une façon expérimentale, la différence des performances entre le contrôle local et le contrôle global est préservée indépendamment de la charge. Par conséquent, nous pouvons conclure que contrôler localement l'affectation d'un mobile lorsque son terminal demande un handover permet de réduire la consommation énergétique des stations de base des cellules voisines (cellules détectées). En gérant les ressources de ces dernières, cela permet de libérer plus de ressources et satisfaire plus de mobiles par la suite.

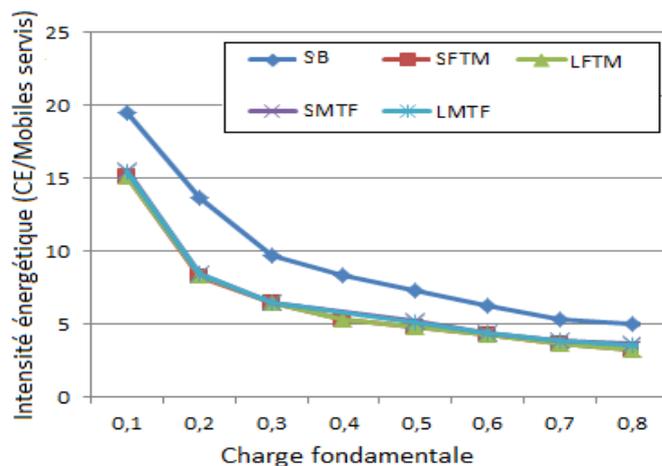


FIGURE 6.6 – Énergie consommée par mobile servi (W)

- Comme analyse globale des résultats obtenus, ces derniers viennent confirmer la conclusion générale obtenue dans le modèle de base. En effet, en intégrant la mobilité dans ce modèle, nous pouvons considérer que la stratégie *SFTM* est plus performante lorsque le nombre de mobiles dans le réseau est limité. Cependant, lorsque ce nombre augmente et à partir d'un certain seuil, il est plus pertinent d'adopter la stratégie *SMTF* qui est efficace et plus stable face à la variation de la charge du réseau. Ces stratégies peuvent être centralisées et permettent de gérer le réseau globalement. Elles peuvent être considérées dans le cadre d'une organisation SON (Self Optimizing/Organizing Network) du réseau.

Dans le cadre de la mobilité, les stratégies de contrôle local *LFTM* et *LMTF* gèrent la sélection de la cellule de connexion lorsque le mobile demande à être affecté à une nouvelle cellule. Cela est plus réaliste en terme de mobilité des utilisateurs, d'une part à cause des contraintes temps réel du réseau, et d'autre part en termes d'équité entre les mobiles.

6.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé deux stratégies de contrôle local d'affectation des utilisateurs mobiles. Ces stratégies ont pour objectif de réduire la consommation énergétique des stations de base des cellules détectées. Elles sont basées sur les stratégies proposées dans le chapitre précédent et consistent en deux phases. Lorsque le terminal d'un mobile demande un handover, il est affecté durant une première phase à une femtocellule ou à une macrocellule selon la priorité d'affectation de la stratégie. Un transfert du mobile est effectué durant la deuxième phase depuis/vers la macrocellule si une meilleure consommation énergétique est constatée suite à ce transfert. Les ressources sont réellement allouées au mobile à la fin de la deuxième phase. Cela permet de contrôler la consommation énergétique de la cellule à laquelle le mobile a été affecté uniquement.

Les résultats obtenus permettent de conclure que dans le cadre de la mobilité, le contrôle local améliore la consommation énergétique des stations de base tout en servant plus de mobiles et en allouant moins de ressources. Lorsque le réseau est faiblement chargé, il est plus efficace d'adopter l'algorithme de contrôle *LFTM*. Cependant, l'algorithme de contrôle *LMTF* est plus efficace et robuste face à l'augmentation de la charge des stations de base.

Le contrôle global de l'affectation des utilisateurs permet d'avoir les mêmes performances qu'un contrôle local. Mais, pour des raisons d'équité entre les mobiles, ce contrôle est plus adapté dans le cadre d'une organisation totale du réseau et non dans le cadre de la mobilité.

D'après les performances obtenues, les stratégies de contrôle (local et global) gèrent difficilement l'affectation des mobiles lorsque le réseau est extrêmement chargé. Pour cela, une prédiction de la mobilité peut aider l'algorithme d'affectation des mobiles à anticiper les demandes de handover des utilisateurs. Cela peut permettre d'économiser plus d'énergie, en particulier lorsque le réseau est fortement chargé.

Chapitre 7

Conclusion et Perspectives

Dans le cadre de cette thèse, nous avons étudié et mis en œuvre des mécanismes de gestion des ressources et de la consommation énergétique des stations de base des macrocellules et des femtocellules dans les réseaux mobiles hétérogènes. Ces mécanismes sont adaptés aux contraintes temps réel dues à la mobilité des utilisateurs, tout en garantissant une QoS satisfaisante et à moindre coût énergétique.

Nous avons d'abord présenté un état de l'art sur les réseaux mobiles et décrit l'architecture considérée dans les travaux de cette thèse. Nous avons présenté et discuté les problèmes auxquels les opérateurs mobiles font face et sur lesquels nous nous sommes concentrés dans ces travaux. En effet, les objectifs des opérateurs mobiles sont d'une part l'amélioration de la QoS offerte aux utilisateurs, et d'autre part la réduction du coût énergétique de leurs réseaux. Ainsi, les travaux réalisés dans cette thèse sont divisés en deux grandes parties complémentaires ; d'une part la sélection d'une cellule de connexion lorsqu'un utilisateur se déplace, et d'autre part la gestion d'allocation des ressources étant donnée la cellule de connexion sélectionnée. Cela permet de contrôler la QoS offerte aux utilisateurs ainsi que le coût énergétique engendré dans un réseau mobile hétérogène.

Dans un premier temps, une gestion prédictive des ressources a été proposée afin d'améliorer la QoS offerte aux utilisateurs selon leurs demandes, autrement dit selon le service qu'ils utilisent (voix, vidéo, ...). Cette gestion utilise un modèle existant de partage d'accès basé sur la théorie des jeux. Ce modèle n'est adapté ni à la mobilité des utilisateurs, ni aux contraintes temps réel des réseaux hétérogènes. Pour cela, la gestion prédictive proposée vise à anticiper le partage des ressources entre les clients mobiles avant qu'ils ne se connectent à la cellule. En utilisant un modèle existant de prédiction de la mobilité des utilisateurs, chaque mobile prédit son prochain point de connexion et anticipe sa demande de ressources. Cela a permis à la cellule prédite de gérer et de préparer l'allocation des ressources disponibles aux mobiles qui ont prédit la connexion à sa station de base avant leur déplacement effectif.

Des données réelles sur des traces de mobilité ont permis d'analyser, par simulations, les performances de cette approche et de les comparer aux performances d'une gestion du partage de ressources de base (sans prédiction de la mobilité). Selon le résultat de la prédiction (juste ou fausse) des utilisateurs, différents scénarios possibles ont été considérés. Cela a permis d'analyser l'impact du résultat de la prédiction du mobile observé sur la QoS offerte à ses concurrents et vice - versa. D'après les résultats de simulations

obtenus, quelle que soit la charge de la cellule de connexion, la QoS offerte aux utilisateurs mobiles est améliorée, ainsi que leur satisfaction en termes d'utilité, notamment lorsque tous les mobiles prédisent bien leurs prochains déplacements. En effet, plus de clients sont satisfaits de la quantité de ressources allouées par la cellule de connexion étant données la capacité disponible et les demandes des concurrents. Cependant, le type des déplacements (régulier, irrégulier ou mixte) de l'utilisateur observé a un impact direct sur la QoS qui lui est offerte ainsi que sur la QoS offerte à ses concurrents. Les travaux de cette partie ont fait l'objet d'une publication [79].

Nous proposons comme perspective d'adopter un modèle de prédiction de la mobilité des utilisateurs plus efficace, notamment lorsque les déplacements du mobile sont irréguliers (par exemple la prédiction basée sur les profils locaux et globaux [61, 62]). En effet, d'après les résultats obtenus, le profil des déplacements d'un utilisateur (régulier, irrégulier ou mixte) a un impact sur sa QoS ainsi que sur celle des autres clients. Ainsi, un modèle de prédiction plus adapté aux déplacements irréguliers des utilisateurs peut permettre d'améliorer les performances du modèle proposé et notamment l'efficacité globale du réseau.

Dans cette approche de gestion prédictive des ressources, la QoS offerte aux utilisateurs mobiles dépend en grande partie de la politique d'allocation des ressources de la station de base. L'objectif considéré est d'allouer le plus de ressources aux mobiles lorsqu'ils sont connectés à la station de base. Pour cela, la politique d'allocation considérée dans ce travail attribue une priorité aux mobiles les plus gourmands en termes de ressources. D'autres heuristiques existent comme celle de l'allocation par catégories [5] afin de résoudre le problème d'allocation des ressources qui est un problème d'optimisation. Elle consiste à classer les mobiles selon leurs demandes et les services qu'ils utilisent. Cela peut améliorer la QoS offerte, notamment lorsque les mobiles prédisent mal leurs prochains déplacements.

Par ailleurs, l'objectif du partage des ressources est d'inciter les clients ayant une station de base de femtocellule chez eux à partager leurs ressources radio. Cependant, seule l'utilité des clients demandeurs de service (utilisateurs mobiles) a été considérée dans cette approche, sans prendre en compte l'utilité des clients fournisseurs (stations de base). Un apprentissage du client fournisseur peut être considéré afin de proposer une gestion des ressources plus efficace pour les mobiles.

Dans la deuxième partie de cette thèse, nous avons proposé un modèle de gestion de l'affectation des utilisateurs afin de contrôler la consommation énergétique du réseau mobile. Les résultats de cette partie ont fait l'objet des publications [87] et [88]. Étant donné la dépendance entre la consommation énergétique des stations de base et la charge de celle-ci, nous avons proposé de gérer en continu le trafic qui circule dans le réseau. Contrairement aux macrocellules, la consommation énergétique d'une station de base de femtocellule est moins sensible (négligeable) à la variation de sa charge. De plus, lorsqu'aucun mobile n'est connecté à sa station de base (cellule vide), celle-ci peut être désactivée.

En se basant sur des algorithmes gloutons, nous avons proposé d'abord un modèle de gestion globale de la consommation énergétique du réseau. Cette gestion vise à affecter

tous les utilisateurs du réseau, étant donnés leurs emplacements statiques dans la zone de couverture. Deux stratégies différentes *SFTM* et *SMTF* ont été proposées dans ces travaux. Chacune d'entre elle attribue une priorité d'affectation aux femtocellules et macrocellules respectivement. Chaque stratégie consiste en une affectation initiale des utilisateurs aux cellules détectées (femto ou macro) selon la priorité considérée. Cette première phase permet de satisfaire le plus d'utilisateurs possibles. Une deuxième phase est considérée dans chacune des stratégies afin d'équilibrer la charge entre les macrocellules et les femtocellules. Cela revient à remettre en cause l'affectation initiale des utilisateurs et à transférer leurs connexions depuis/vers les macrocellules détectées si et seulement si cela permet une réduction de la consommation énergétique globale du réseau. Après l'équilibrage de la charge entre les cellules femto et macro, les stations de base des femtocellules vides peuvent être désactivées.

En utilisant des données réelles d'une topologie de réseau mobile, nous avons pu constaté par simulation, que le facteur clé pour une réduction de la consommation énergétique est la sélection de la cellule de connexion. En effet, les stratégies *SFTM* et *SMTF* sont plus efficaces que les stratégies d'affectation des utilisateurs basées sur la qualité du signal de transmission, notamment lorsque les stations de base des femtocellules vides sont désactivées. Elles permettent de réduire le coût énergétique global du réseau tout en servant plus d'utilisateurs, allouant moins de ressources et désactivant plus de femtocellules quelle que soit la charge des cellules. En particulier, attribuer une priorité d'affectation aux femtocellules, telle que la stratégie *SFTM*, permet d'améliorer les performances du réseau lorsqu'il est faiblement chargé. Par ailleurs, attribuer une priorité d'affectation des utilisateurs aux macrocellules permet au réseau d'être plus robuste face à la variation de sa charge. Cependant, lorsque la mobilité des utilisateurs est prise en compte, les stratégies de gestion globale *SFTM* et *SMTF* sont peu réalistes. Remettre en cause la connexion de tous les mobiles lorsque l'un d'entre eux se déplace ne semble pas équitable. Pour cela, les stratégies de gestion globale sont plus adaptées au processus d'auto-organisation/optimisation du réseau lorsque ce processus est considéré.

En se basant sur le modèle de gestion globale, nous avons proposé deux stratégies *LFTM* et *LMTF* de gestion locale d'affectation des utilisateurs lorsqu'ils se déplacent. Ces stratégies visent à sélectionner la nouvelle cellule de connexion à chaque fois qu'un mobile se déplace et que son terminal demande un handover. Chaque stratégie sélectionne une femtocellule ou une macrocellule, parmi les cellules détectées, selon la priorité d'affectation correspondante. De la même façon que dans le modèle de gestion globale, la deuxième phase vise à remettre en cause l'affectation initiale du mobile et transférer sa connexion vers/ depuis une macrocellule détectée si et seulement si cela permet de réduire la consommation énergétique du réseau. Contrairement au transfert de trafic dans le modèle de gestion globale, ce transfert vise à réduire la consommation énergétique des stations de base des cellules voisines ce qui a moins d'impact sur les connexions des mobiles présents dans le réseau. Selon les résultats de simulation obtenus en utilisant des données de topologies réelles de réseau, les stratégies de contrôle local *LFTM* et *LMTF* permettent au réseau d'être aussi efficace que lorsque les stratégies de contrôle global *SFTM* et *SMTF* sont considérées. La consommation énergétique du réseau, en particulier des stations de base, est réduite tout en servant plus de mobiles et en

allouant moins de ressources quelle que soit la charge du réseau.

Les stratégies de contrôle global et local étant meilleures que les stratégies adoptées actuellement par les opérateurs mobiles, elle ne sont pas optimales. Par ailleurs, calculer une solution optimale au problème d'affectation des utilisateurs est difficile étant données la taille du réseau considéré, sa charge et les positions géographiques des mobiles. Le modèle de gestion d'affectation des utilisateurs a permis de montrer que le facteur clé pour réduire la consommation énergétique et augmenter la capacité du réseau est la gestion continue du trafic. Dans ce travail, nous avons étudié plusieurs critères d'affectation qui ont permis d'améliorer l'efficacité du réseau comparée à d'autres critères (qualité du signal de transmission, le nombre d'utilisateurs dans la zone de couverture, la capacité disponible et le ratio entre les deux critères précédents). Proposer d'autres heuristiques et étudier d'autres critères d'affectation pour ce problème peut permettre d'améliorer encore plus les performances du réseau tout en respectant les contraintes temps réel engendrées par la vitesse de mobilité des utilisateurs, notamment lorsque le réseau est fortement chargé. En effet, parmi ces heuristiques, nous proposons de combiner le modèle de gestion de partage de ressources au modèle d'affectation des utilisateurs, notamment lorsque plusieurs clients fournisseurs de service (stations de base) peuvent satisfaire la demande du mobile. En effet, dans le modèle de gestion d'affectation des utilisateurs, la quantité demandée par les mobiles était fixe par hypothèse. Pour cela, un modèle complet de gestion de mobilité des utilisateurs basé sur les deux modèles proposés dans cette thèse (gestion d'affectation des utilisateurs et gestion anticipée des ressources) serait intéressant dans le but de satisfaire les demandes de plus de mobiles et à moindre coût.

Le modèle de prédiction de la mobilité des utilisateurs permet d'anticiper le processus de handover. Considérer ce modèle dans la gestion d'affectation des utilisateurs peut constituer une solution aux contraintes temps réel et offrir une gestion anticipée de la consommation énergétique et de la sélection de la nouvelle cellule de connexion des utilisateurs dans le réseau. En particulier, cela offre plus de temps au réseau pour s'auto-organiser en adoptant un contrôle global, et offrir une meilleure QoS aux utilisateurs.

Notons que le réseau actuel est sous-utilisé. Une gestion réfléchie lui permettra d'être encore plus efficace et satisfaire plus de clients. Nous concluons par rappeler que le besoin d'améliorer la QoS et réduire le coût énergétique est permanent. Le nombre de clients mobiles et les services qu'ils demandent continuent d'augmenter, et d'autre part, nous devons tenir compte des contraintes climatiques, épuisement des ressources et des rapports de force internationaux tout en réduisant l'énergie consommée.

Annexes

Chapitre A

Sélection de la cellule de connexion

Des tests avec d'autres critères de sélection de la cellule de connexion ont été considérés, notamment la capacité disponible de la femtocellule. Dans ce cas, un utilisateur est affecté à la femtocellule disposant de la capacité maximale. Ce critère a pour but de servir le plus d'utilisateurs possible sans prendre en compte le contrôle de la consommation d'énergie et le principe de d'affectation déjà mentionné.

Le ratio de la capacité disponible par le nombre d'utilisateurs non affectés dans le voisinage a été également considéré comme critère de sélection de la femtocellule de connexion. De façon expérimentale, le critère de sélection basé sur le nombre d'utilisateurs dans le voisinage permet de mieux contrôler la consommation d'énergie tout en servant le même nombre d'utilisateurs que le critère basé sur la capacité disponible ou le ratio. Ce critère permet de satisfaire le mieux les objectifs fixés dans le chapitre 5. Le tableau A.1 résume les scénarios considérés.

Pour chacun des scénarios considéré, les résultats obtenus sont présentés dans les figures suivantes.

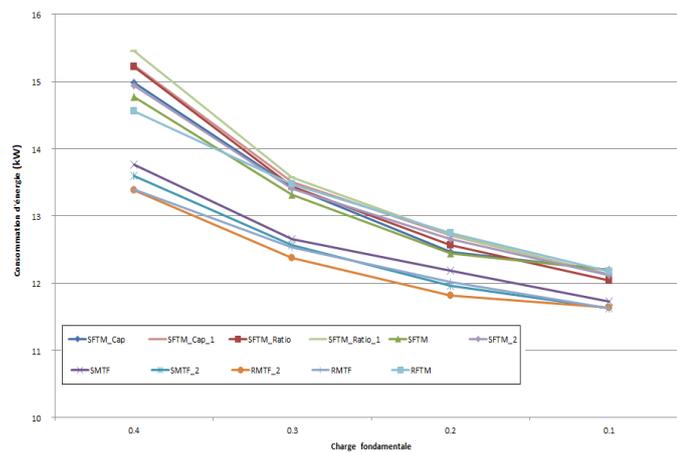


FIGURE A.1 – Consommation énergétique globale du réseau.

Stratégie	Phase 1		Phase 2 Transfert du trafic
	Algorithme glouton d'affectation initiale		
	Priorité d'affectation	Complément d'affectation	
$SFTM$	Femto cellule ayant le <i>degré maximal</i>	Macro cellule la plus proche	FTM
$SFTM_2$	Femto cellule ayant le <i>degré maximal</i>	Macro cellule ayant le degré minimal	FTM
$SFTM_{Cap}$	Femto cellule ayant la <i>capacité disponible maximale</i>	Macro cellule la plus proche	FTM
$SFTM_{Cap_2}$	Femto cellule ayant la <i>capacité disponible maximale</i>	Macro cellule avec le degré minimal	FTM
$SFTM_{Ratio}$	Femto cellule ayant le <i>ratio maximal</i> (capacité/degré)	Macro cellule la plus proche	FTM
$SFTM_{Ratio_2}$	Femto cellule ayant le <i>ratio maximal</i> (capacité/degré)	Macro cellule avec le degré minimal	FTM
$SMTF$	Macro cellule ayant le <i>degré minimal</i>	Femto cellule la plus proche	MTF
$SMTF_2$	Macro cellule ayant le <i>degré minimal</i>	Femto cellule ayant le degré maximal	MTF
$RFTM$	Femto cellule la plus proche	Macro cellule la plus proche	FTM
$RMTF$	Macro cellule la plus proche	Femto cellule la plus proche	MTF
$RMTF_2$	Macro cellule la plus proche	Femto cellule ayant le degré maximal	MTF

TABLE A.1 – Scénarios des stratégies considérées

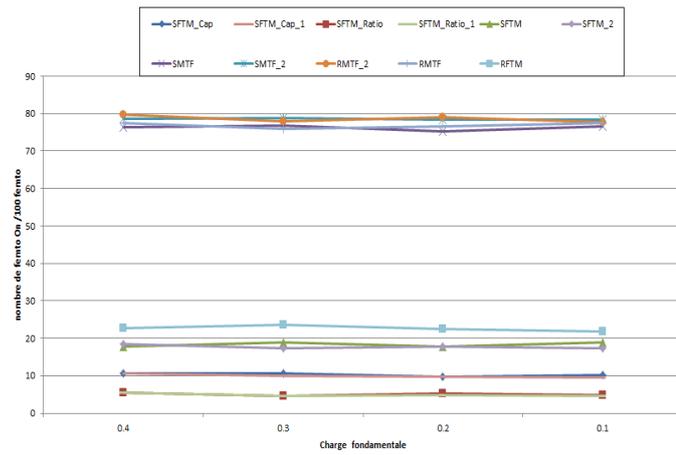


FIGURE A.2 – Pourcentage des femtocellules actives

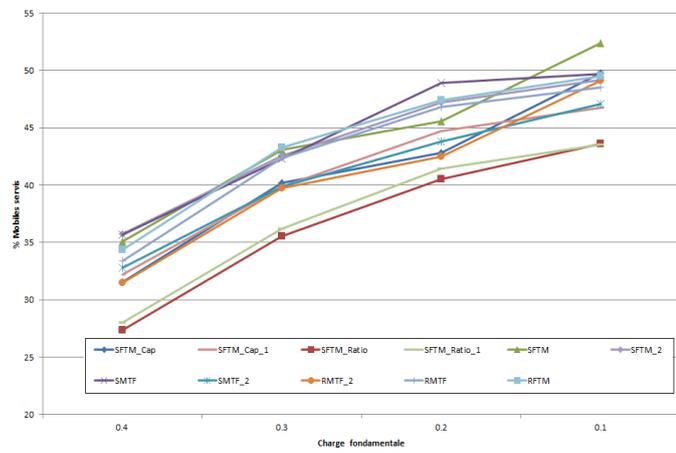


FIGURE A.3 – Pourcentage des utilisateurs servis

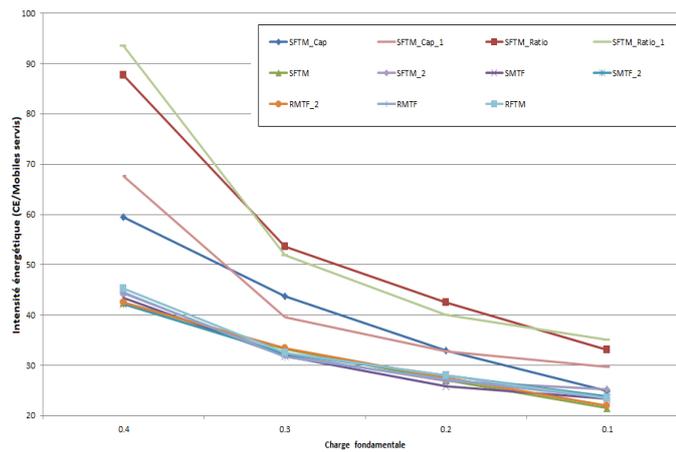


FIGURE A.4 – Intensité énergétique du réseau

Chapitre B

Taille du sous-ensemble des femtocellules potentielles

En faisant varier la taille du sous-ensemble des femtocellules F_1 (voir Section 5.3.1), nous obtenons les résultats présentés dans les figures B.1, B.2, B.3 et B.4. nces des approches proposées pour différentes valeurs de la taille du sous-ensemble des femtocellules F_1 . La charge fondamentale des cellules est fixé à 40%. Ces figures présentent, respectivement, la consommation énergétique globale du réseau, le pourcentage de femtocellules activées, le nombre de mobiles servis et l'intensité énergétique du réseau lorsque sa charge fondamentale est à 20%.

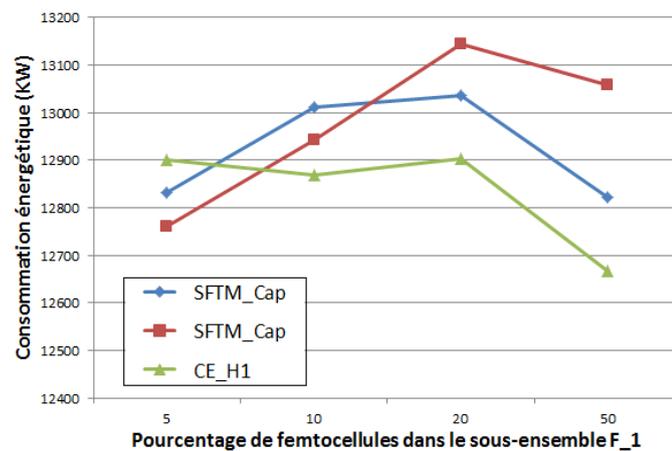


FIGURE B.1 – Consommation énergétique globale du réseau.

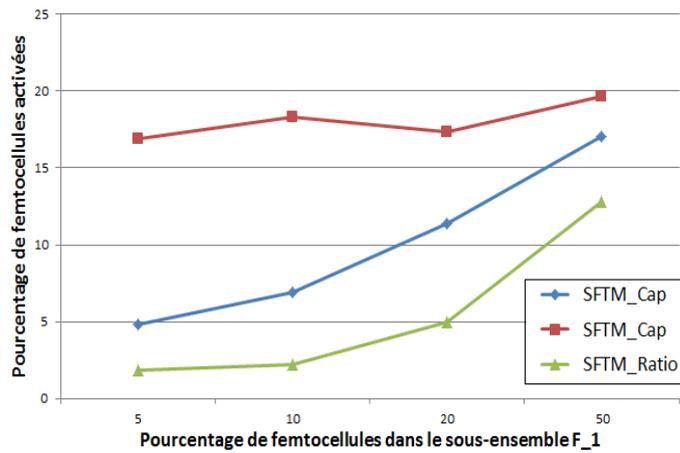


FIGURE B.2 – Pourcentage des femtocellules actives

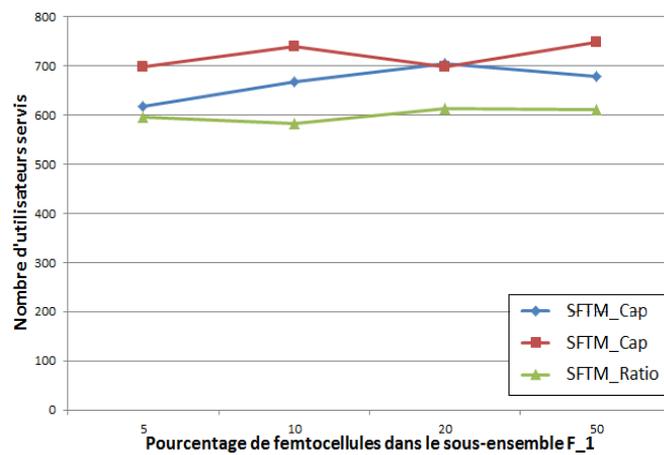


FIGURE B.3 – Pourcentage des utilisateurs servis

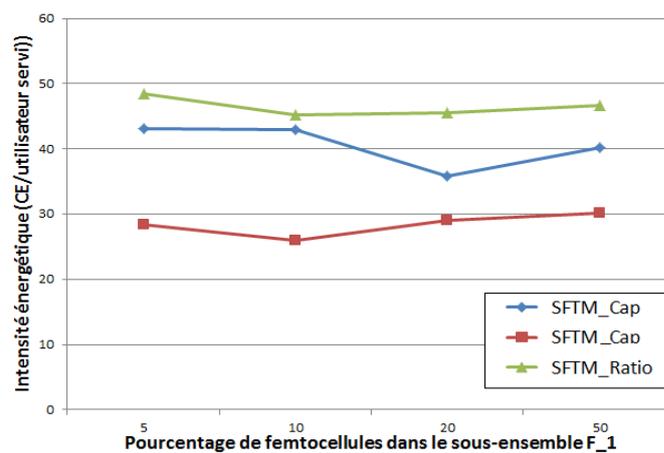


FIGURE B.4 – Intensité énergétique du réseau

Chapitre C

Le dilemme du prisonnier

C'est l'un des problèmes classiques de la théorie des jeux. La police arrête deux individus qu'elle interroge simultanément dans deux pièces différentes. Les deux personnes sont complices d'un crime qu'elles ont commis. La police ne peut prouver leur culpabilité à moins que l'un d'entre eux confesse. Chacun des prisonniers a le choix entre deux stratégies possibles : soit coopérer avec son complice et **se taire** ou **confesser** à la police comme suit :

- si les deux prisonniers **se taisent** alors ils seront condamnés à un an de prison chacun,
- si les deux **confessent** alors ils seront condamnés à deux ans de prison chacun,
- si l'un **confesse** et dénonce son complice alors que ce dernier **se tait**, le premier sera innocenté. Quand à l'autre, il aura une peine de trois ans de prison.

Les deux prisonniers sont des joueurs tel que $J = \{1, 2\}$. L'ensemble des stratégies possibles S_i pour chaque joueur i avec $i \in J$ est défini par $S_i = \{Confesser, Se taire\}$. Le tableau C.1 résume les stratégies possibles de chaque joueur ainsi que le gain correspondant. Chaque croisement ligne-colonne du tableau C.1 présente un profil de jeu Π possible ainsi que le couple de gains (g_1, g_2) des deux joueurs qui correspondent à ce profil.

Le gain qu'un joueur peut percevoir en fonction d'un profil de jeu est le nombre d'années de en liberté (en n'étant pas emprisonné). L'objectif de chaque joueur est d'avoir le nombre minimum d'années de prison. Cela revient à maximiser son gain étant donné la décision de son concurrent.

		Joueur 2	
		Confesser	Se taire
Joueur 1	Confesser	1, 1	3, 0
	Se taire	0, 3	2, 2

TABLE C.1 – Matrice des stratégies possibles et gains correspondants

Le joueur 1 et le joueur 2, étant rationnels, doivent décider de la stratégie qui maximise leurs gain par colonne et par ligne respectivement (voir Table C.2). Le raisonnement de chaque joueur doit être comme suit :

Si le joueur 2 confesse, le joueur 1 a le choix entre confesser et avoir un gain égal à 1 ou se taire et avoir un gain égal à 0 (Tableau C.2-a). Dans ce cas, le joueur 1 a intérêt à confesser lorsque le joueur 2 confesse pour avoir un gain égal à 1.

		<i>Joueur 2</i>	
		Confesser	Se taire
<i>Joueur 1</i>	Confesser	1, 1	3, 0
	Se taire	0, 3	2, 2

(a) Meilleures stratégies du joueur 1

		<i>Joueur 2</i>	
		Confesser	Se taire
<i>Joueur 1</i>	Confesser	1, 1	3, 0
	Se taire	0, 3	2, 2

(b) Meilleures stratégies du joueur 2

TABLE C.2 – Meilleures stratégies des joueurs

Si le joueur 2 se tait, le joueur 1 peut confesser et avoir un gain égal à 3 ou se taire et avoir un gain égal à 2. Il choisira donc de confesser et gagner 3. Selon ce raisonnement, le joueur 1 a intérêt à confesser quelle que soit la décision du joueur 2. De la même façon, le joueur 2 doit décider sa stratégie et a intérêt à confesser.

Dans le meilleur cas, l'un des joueurs aura un gain maximal (gain égal à 3) et l'autre regrettera sa stratégie. Au pire des cas, les deux joueurs auront un gain égal à 1, mais aucun d'entre eux ne regrettera son choix et c'est un équilibre de Nash [76].

Bibliographie

- [1] J. AKOKA et I. COMYN-WATTIAU : *Encyclopédie de l'informatique et des systèmes d'information*. Vuibert, 2006.
- [2] Sasan ADIBI, Raj JAIN, Shyam PAREKH et Tom TOFIGH : *Quality of Service Architectures for Wireless Networks : Performance Metrics and Management*. Information Science Publishing, March 2010.
- [3] Jeanette WANNSTROM et Keith MALLINSON : *Heterogeneous networks in lte. 3GPP. The mobile broadband standard*, 2014.
- [4] Daniel CLÉMANT et Pierre PAPON : *Vers une énergie durable ?* Le Pommier, octobre 2010.
- [5] Mariem KRICHEN : *Modèle technico-économique pour le déploiement d'un réseau femto avec le partage de ressources*. Thèse de doctorat, UVSQ, 2014. Thèse de doctorat dirigée par Barth, Dominique Informatique Versailles-St Quentin en Yvelines 2014.
- [6] Paolo DINI, Marco MIOZZO, Nicola BUI et Nicola BALDO : A Model to Analyze the Energy Savings of Base Station Sleep Mode in LTE HetNets. *In Green Computing and Communications (GreenCom), IEEE and Internet of Things (iThings/CPSCoM), IEEE Cyber, Physical and Social Computing*, pages 1375–1380, août 2013.
- [7] L. SAKER, S-E ELAYOUBI, R. COMBES et T. CHAHED : Optimal Control of Wake Up Mechanisms of Femtocells in Heterogeneous Networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*,, 2012.
- [8] Internet mobile, 2008.
- [9] David ANDRY : Partie I : Historique des Réseaux mobiles.
- [10] Réseau de téléphonie mobile, décembre 2015. Page Version ID : 121186439.
- [11] Comprendre la technologie UMTS. *In CNET France*, 2016.
- [12] Kevin R. FALL et W. Richard STEVENS : *TCP/IP Illustrated, Volume 1 : The Protocols*. Addison - Wesley, novembre 2011.
- [13] K.A. AGHA, G. PUJOLLE, G. VIVIER et B. VIDAL : *Réseaux de mobiles et réseaux sans fil*. Eyrolles, 2001.
- [14] About mobile technology and IMT-2000. *In International Telecommunication Union (ITU)*.

- [15] Mustafa ERGEN : *Mobile Broadband : Including WiMAX and LTE*. Springer Science & Business Media, avril 2009.
- [16] Kamran ETEMAD et Ming-Yee LAI : *WiMAX Technology and Network Evolution*. John Wiley & Sons, février 2011.
- [17] ITU defines vision and roadmap for 5g mobile development.
- [18] International Telecommunication Union (ITU) : Future technology trends of terrestrial imt systems. (series mobile, radio determination, amateur and related satellite services). *Report ITU-R M.2320-0*, November 2014.
- [19] Samir BELLAHSENE : *Prédiction de la mobilité pour la gestion des handovers dans les réseaux IP : modèles et algorithmes*. Thèse de doctorat, UVSQ, 2012. Thèse de doctorat dirigée par Barth, Dominique et Leila KLOUL Informatique Versailles-St Quentin en Yvelines 2012.
- [20] T.SIMONITE : Qualcomm Proposes a Cell-Phone Network by the People, for the People, 2013.
- [21] LTE advanced : Heterogeneous networks, 2011.
- [22] M. Zaman CHOWDHURY, Y. Min JANG et Zygmunt J. HAAS : Network evolution and QoS provisioning for integrated femtocell/macrocell networks. *International Journal of Wireless & Mobile Networks (IJWMN)*, 2(3), Août 2010.
- [23] Comment fonctionne un réseau de téléphonie mobile ? *In Bouygues Telecom*, 2014.
- [24] Jeffrey G. ANDREWS, Holger CLAUSSEN, Mischa DOHLER, Sundeep RANGAN et Mark C. REED : Femtocells : Past, present, and future. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 30(3):497–508, 2012.
- [25] L. WANG, Y. ZHANG et Z. WEI : Mobility management schemes at radio network layer for LTEfemtocells. *DOCOMO Beijing Communications Laboratory Co. Ltd., Beijing, Chine*, 2009.
- [26] H. ZHANG, X. CHU et X. WEN : 4G femtocells : Resource allocation and interference management. *In Springer Briefs in Computer Science*, 2013.
- [27] Lte ; evolved universal terrestrial radio access (e-utra) ; physical channels and modulation. *Release 12. TS 136211*, 12.8.0.
- [28] Michel GONDRAN et Michel MINOUX : *Graphes et algorithmes*. Lavoisier, 2009.
- [29] EDF ÉNERGIE NOUVELLE RÉPARTIES (ENR) : Panneaux solaires sur votre toit, 2016.
- [30] Martin VARSAVSKY : Fon is the global wifi network, 2014.
- [31] Jignesh S. PANCHAL : *Inter-operator resource sharing in 4G LTE cellular networks*. Thèse de doctorat, 2011. PhD at The State University of New Jersey.
- [32] 3GPP : Network sharing ; architecture and functional description. *3GPP TS 23.251*, 2014.
- [33] M. BUDDHIKOT, P. KOLODZY, S. MILLER, K. RYAN et J. EVANS : New directions in wireless networking using coordinated dynamic spectrum access. *IEEE WoWMoM, Taromina/Giardini Naxos*, Jun 2005.

- [34] M. BUDDHIKOT, I. KENNEDY, F. MULLANY et H. VISWANATHAN : Ultra-broadband femtocells via opportunistic reuse of multi-operator and multi-service spectrum. *In BLTJ Special Issue on 4G Networks*, Feb 2009.
- [35] J. ACHARYA et R. D. YATES : A framework for dynamic spectrum sharing between cognitive radios. *Proceeding ICC*, June 2007.
- [36] S. BANERJEE, A. MISHRA, V. BRIK, V. SHIRVASTAVA et V. BAHL : Towards an architecture for efficient spectrum slicing. *IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications (HotMobile)*, February 2007.
- [37] M. KRICHEN, J. COHEN et D. BARTH : Techno economic model for sharing femto access. *5th ICST VALUETOOLS*, Mai 2011.
- [38] 3GPP : Base station power model. *In Release 11*, pages Release11–3495, China, octobre 2014.
- [39] Imran ASHRAF, Federico BOCCARDI et Lester HO : SLEEP mode techniques for small cell deployments. *IEEE Communications Magazine*, 2011.
- [40] Antonio SPAGNUOLO, Antonio PETRAGLIA, Carmela VETROMILE, Roberto FORMOSI et Carmine LUBRITTO : Monitoring and optimization of energy consumption of base stations. *Energy*, 2015.
- [41] 3gpp TR 36.104 v10.3.0 WG1. 3rd Generation Partnership Project ; Technical Specification Group Radio Access Network ; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) ; Base Station radio transmission and reception. *In Release 10*, juin 2011.
- [42] Zhisheng NIU, Yiqun WU, Jie GONG et Zexi YANG : Cell zooming for cost-efficient green cellular networks. *Communications Magazine, IEEE*, novembre 2010.
- [43] Marco Ajmone MARSAN, Luca CHIARAVIGLIO, Delia CIULLO et Michela MEO : Multiple daily base station switch-offs in cellular networks. *In Communications and Electronics (ICCE), 2012 Fourth International Conference on*, pages 245–250. IEEE, 2012.
- [44] Handover. *In Wikipédia ID : 118006875*, août 2015.
- [45] Mécanisme de handover dans les réseaux LTE et WiMax. *In TELECOM Lille*, 2010.
- [46] 3GPP : LTE, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA), Radio Resource Control (RRC), Protocol specification. *In Electronic Signatures and Infrastructures (ESI). Release 13.TS 36.331*, 2013.
- [47] Why no Soft Handover in LTE. *In 3G LTE Info*, mai 2014.
- [48] WG1 : 3rd Generation Partnership Project ; Technical Specification Group Radio Access Network ; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) ; Base Station radio transmission and reception (Release 10). *In 3GPP TR.36.104*, volume 10.3.0, juin 2011.
- [49] Jihai HAN et Bingyang WU : Handover in the 3gpp long term evolution systems. *In Global Mobile Congress (GMC)*, pages 1–6, Oct 2010.

- [50] J. CHANG, Y. LI, S. FENG, H. WANG, C. SUN et P. ZHANG : A fractional soft handover scheme for 3gpp lte-advanced system. *In 2009 IEEE International Conference on Communications Workshops*, pages 1–5, June 2009.
- [51] S. BELLAHCENE : *Prédiction de la mobilité pour la gestion des handovers dans les réseaux IP : modèles et algorithmes*. Thèse de doctorat, Université de Versailles, Mai 2011.
- [52] A. RAHMATI et L. ZHONG : CRAWDAD data set rice/context (v. 2007-05-23), mai 2007.
- [53] 3GPP : LTE Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) Physical layer Measurements. 2011.
- [54] P. ATELIN : *Réseaux informatiques Notions fondamentales (Normes, Architecture, Modèle OSI, TCP/IP, Ethernet, Wi-Fi,...)*. Ressources Informatiques. Informatique technique. Editions ENI, 2009.
- [55] 3GPP : Lte evolved universal terrestrial radio access (e-utra) user equipment (ue) procedures in idle mode. 2011.
- [56] D. AMZALLAG, M. LIVSCHITZ, J. NAOR et D. RAZ : Cell planning of 4g cellular networks : Algorithmic techniques, and results. *3G and Beyond, 6th IEE International Conference*, 7-9 Nov 2005.
- [57] Qualcomm EUROPE : Importance of serving cell selection in hornets. *RI-094882*, 1994.
- [58] Keon-Wook LEE, Jae-Yun KO et Yong-Hwan LEE : Fast cell site selection with interference avoidance in packet based ofdm cellular systems. *Global Telecommunications Conference*, Nov 2006.
- [59] Mohamed A. ABOULHASSAN, Essam A. SOUROUR et Shawki SHAABAN : Novel cell selection procedure for ltehetnets based on mathematical modelling of proportional fair scheduling. *International Journal of Wireless & Mobile Networks*, 5(6), Dec 2013.
- [60] Hakima CHAOUCHI : QoS-aware handover control in current and future wireless/mobile networks. *Annales des Télécommunications*, 59(5-6):731–746, mai 2004.
- [61] Jean-Marc FRANÇOIS et Guy LEDUC : Prédiction de mobilité par le mobile ou par le point d'accès : comparaison sur base de traces réelles. *Colloque Francophone sur l'Ingénierie des Protocoles (CFIP)*, 2006.
- [62] D. BARTH, S. BELLAHSENE et L. KLOUL : Mobility prediction using mobile user profiles. *In Proceedings of the 19th international conference on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS)*.
- [63] M.C. GONZÁLEZ, C.A. HIDALGO et A-L. BARABÀSI : Understanding individual human mobility patterns. *In CoRR*, volume abs/0806.1256, pages 779–782, 2008.
- [64] R. SANKAR et N. SAVKOOR : A combined prediction system for handoffs in overlaid networks. *In In 3rd IEEE ICC, Vancouver*, June 1999.
- [65] G. LIU et Jr G. MAGUIRE : A class of mobile motion prediction algorithms for wireless mobile computing and communication. *Mobile Networks and Applications*, 1(2):113–121, 1996.

- [66] J. CHAN, S. ZHOU et A. SENEVIRATNE : A qos adaptive mobility prediction scheme for wireless networks. *In IEEE GLOBECOM*, volume 3, pages 1414–1419, 1998.
- [67] Maher AL-SANABANI, Subramaniam SHAMALA, Mohamed OTHMAN et Zuriati ZUKARNAIN : Mobility prediction based resource reservation for handoff in multi-media wireless cellular networks. *The International Arab Journal of Information Technology*, 5(2):162–169, 2008.
- [68] S. BELLAHSENE et L. KLOUL : A New Markov-Based Mobility Prediction Algorithm for Mobile Networks. *The European Workshop on Performance Engineering EPEW*, 2010.
- [69] S. BELLAHSENE, L. KLOUL et D. BARTH : A hierarchical prediction model for two nodes-based IP mobile networks. *In 12th MSWiM*, 2009.
- [70] F. CHINCHILLA, M. LINDSEY et M. PAPAPOULI : Analysis of wireless information locality and association patterns in a campus. *In 23rd INFOCOM*, Hong Kong, China, 2004.
- [71] L. SONG, D. KOTZ, R. JAIN et X. HE : Evaluating location predictors with extensive wi-fi mobility data. *In IEEE 23rd INFOCOM*, Hong Kong, China, 2004.
- [72] Xu CHEN, François MÉRIAUX et Stefan VALENTIN : Predicting a user’s next cell with supervised learning based on channel states. *CoRR*, abs/1305.2776, 2013.
- [73] D. BARTH, S. BELLAHSENE et L. KLOUL : Combining local and global profiles for mobility prediction in LTE femtocells. *In The 15th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, 2012.
- [74] Dominique BARTH, Amira CHOUTRI, Leila KLOUL et Olivier MARCÉ : Femtocells Sharing Management using mobility prediction model. *In HAL-INRIA, hal-00847920, version 1*, juillet 2013.
- [75] Noam NISAN, Tim ROUGHGARDEN, Eva TARDOS et Vijay V. VAZIRANI : *Algorithmic Game Theory*. Cambridge University Press, 2007.
- [76] James D. MILLER : *Game Theory at work, How to use game theory to outthink and outmaneuver your competition*. McGraw-Hill, 2003.
- [77] F. JOHN : Equilibrium points in n-person games. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, pages 36 :48–49, 1950.
- [78] L.P. KAELBLING : *Learning in Embedded Systems*. A Bradford book. MIT Press, 1993.
- [79] Dominique BARTH, Amira CHOUTRI, Leila KLOUL et Olivier MARCÉ : Femtocells sharing management using mobility prediction model. *In Proceedings of the 16th ACM International Conference on Modeling, Analysis & Simulation of Wireless and Mobile Systems, MSWiM '13*, pages 59–64. ACM, 2013.
- [80] J.R. NORRIS : *Markov Chains*. Cambridge Series in Statistical and Probabilistic Mathematics. Cambridge University Press, 1998.
- [81] Jim ZYREN et Wes MCCOY : Overview of the 3gpp Long Term Evolution Physical Layer. *In 3GPP Evolution WP. Rev 0*, jul 2007.
- [82] Teofilo F. GONZALEZ : *Handbook of Approximation Algorithms and Metaheuristics*. CRC Press, may 2007.

- [83] M.R. GAREY et D.S. JOHNSON : *Computers and Intractability : A Guide to the Theory of NP-Completeness*. W. H. Freeman, 1979.
- [84] B. BEHSAZ et M.R. Salavatipour and Z. SVITKINA : New approximation algorithms for the unsplittable capacitated facility location problem. *In Algorithm Theory SWAT*, 2012.
- [85] Y. AZAR, J. NAOR et R. ROM : The competitiveness of on-line assignments. *In Journal of Algorithms, Issue 2*, volume 18, mars 1995.
- [86] D. KNISELY, T. YOSHIZAWA et F. FAVICHIA : Standardization of femtocells in 3gpp. *In Communications Magazine, IEEE*, volume 47, pages 68–75, septembre 2009.
- [87] Dominique BARTH, Amira CHOUTRI, Leila KLOUL et Olivier MARCÉ : Centralized mobile users assignment strategies for energy management in het-lte networks. *In Proceedings of the 9th EAI International Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools, VALUETOOLS'15*, pages 79–86. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering), 2016.
- [88] Dominique BARTH, Amira CHOUTRI, Leila KLOUL et Olivier MARCÉ : Mobile users assignment control strategies for lte networks. *In Wireless Days (WD)*, pages 1–8, March 2016.