

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

GESTION DES RESSOURCES ET DE LA QUALITÉ DE SERVICE DANS UN
RÉSEAU MOBILE HÉTÉROGÈNE DE PROCHAINE GÉNÉRATION

RACHA BEN ALI
DÉPARTEMENT DE GÉNIE INFORMATIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

THÈSE PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
PHILOSOPHIÆ DOCTOR
(GÉNIE INFORMATIQUE)

AVRIL 2008



Library and
Archives Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Published Heritage
Branch

Direction du
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 978-0-494-41741-6

Our file Notre référence

ISBN: 978-0-494-41741-6

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Cette thèse intitulée :

GESTION DES RESSOURCES ET DE LA QUALITÉ DE SERVICE DANS UN
RÉSEAU MOBILE HÉTÉROGÈNE DE PROCHAINE GÉNÉRATION

présentée par : BEN ALI Racha

en vue de l'obtention du diplôme de : Philosophiæ Doctor

a été dûment acceptée par le jury composé de :

M. QUINTERO Alejandro, Doct., président

M. PIERRE Samuel, Ph.D., membre et directeur de recherche

M^{me}. BELLAÏCHE Martine, Ph.D., membre

M. HOULE Alain, Ph.D., membre

À ma famille,

Remerciements

Mes remerciements vont en premier lieu à mon directeur de recherche le professeur Samuel Pierre, titulaire de la Chaire CRSNG - ERICSSON en Systèmes Réseautiques Mobiles de Prochaines Générations et directeur du Laboratoire de Recherche en Réseautique et Informatique Mobile (LARIM). Je tiens à le remercier non seulement pour avoir cru en moi mais aussi pour son soutien constant et ses précieux conseils qui m'ont guidé tout au long de ma recherche.

Je remercie également mes collègues et le personnel du LARIM pour leur collaboration et surtout pour l'ambiance de travail chaleureuse.

Je remercie de tout cœur, mes parents et mes copains qui m'ont toujours encouragé et aidé moralement tout au long de mon doctorat. En terminant, un merci particulier à ma douce et très chère fiancée Kaouther pour son soutien, son aide précieuse et ses encouragements.

Résumé

Puisqu'il n'existe aucune technologie d'accès sans fil qui peut à elle seule fournir une capacité élevée et une couverture globale à coût abordable pour des usagers mobiles de plus en plus exigeants, les réseaux mobiles hétérogènes actuels et futurs doivent à cet effet être intégrés efficacement afin de profiter à un nombre croissant de stations mobiles multi-mode. Cette efficacité d'intégration dans le réseau d'accès hétérogène d'un réseau mobile hétérogène de prochaine génération (RMHPG) peut être réalisée en utilisant plusieurs approches que nous étudions dans cette thèse.

Dans un premier volet de cette thèse, nous proposons un nouveau cadre analytique générique de modèles et algorithmes servant à évaluer avec précision les paramètres de qualité de service (QoS) au niveau appel de n'importe quel type de RMHPG implantant les relèves verticales et les stratégies de sélection du réseau. En utilisant ce cadre analytique, nous estimons et comparons les taux de relève et les probabilités de blocage sous un modèle standard exponentiel, un modèle général Gamma et un modèle précis Hyper-exponentiel du temps de résidence cellulaire dans les cellules hétérogènes GPRS, UMTS et WLAN. Les résultats montrent qu'étant donné les différentes variabilités du temps de résidence cellulaire, les probabilités de blocage sous le modèle exponentiel sont sur-estimées pour les cellules UMTS et largement sous-estimées pour les cellules WLAN. De plus, ces probabilités de blocage sont sur-estimées sous le modèle Gamma pour les cellules WLAN.

Dans un deuxième volet de cette thèse, nous proposons, analysons et validons un algorithme de contrôle d'admission optimal de voix dans un réseau 3G/WLAN intégré. Nous fournissons des modèles analytiques, validés par des simulations à événements discrets, pour l'évaluation des performances du blocage du contrôle d'admission optimal sous différents schémas d'allocation de la bande passante sans fil pour les appels en relève verticale.

Pour cela nous dérivons de nouvelles expressions pour les probabilités de coupure d'appel sous différents schémas d'intégration. Les résultats de performance montrent que, comparativement à un schéma d'intégration forte pour l'allocation de la bande passante, un schéma d'intégration faible entre 3G et WLAN fournit un bon moyen pour limiter l'augmentation des probabilités de blocage dans les cellules 3G qui sont souvent surchargées et coûteuses en bande passante. Les modèles proposés peuvent aider les concepteurs des réseaux à prédire les performances d'une éventuelle intégration entre réseau 3G et réseau WLAN selon un schéma d'intégration particulier.

Dans un troisième volet de cette thèse, nous évaluons l'impact de la mobilité et du soft handoff vertical sur les performances du contrôle d'admission optimal de voix dans un réseau 3G/WLAN faiblement intégré. En particulier, nous proposons de nouveaux modèles précis de mobilité et de soft handoff vertical dans ce RMHPG typique. De plus, nous analysons et comparons les probabilités de blocage du contrôle d'admission optimal de voix sous différents algorithmes de soft handoff vertical. En utilisant ces modèles, nous montrons qu'un algorithme de soft handoff d'efficacité optimale en allocation de ressources appelé RESHO donne des performances significativement meilleures qu'un algorithme standard basé sur un seuil statique de la puissance du signal reçu appelé STSHO. En outre, les résultats de performance montrent que la réduction des probabilités de blocage dans le réseau 3G est largement augmentée en utilisant RESHO particulièrement lorsque les vitesses des stations mobiles multi-modes ont une faible moyenne et une forte variabilité. Ces vitesses caractérisent typiquement un environnement de mobilité dans une zone WLAN. Le modèle que nous proposons peut aider les concepteurs des réseaux à déterminer si les performances gagnées par un algorithme complexe RESHO par rapport à l'algorithme standard STSHO sont assez significatives pour considérer son implémentation dans les réseaux WLAN intégrés faiblement aux réseaux 3G.

Abstract

Since there is no single mobile wireless technology that can provide both high system capacity and cost effective global service coverage for more demanding mobile users, existent and future heterogeneous mobile networks have to be efficiently integrated for this purpose profiting to an increasing number of multi-mode mobile stations. This integration efficiency in what we call a next generation heterogeneous mobile network (NGHMN) can be achieved using several approaches that we investigate in this thesis.

In a first contribution, we provide models and algorithms in a newly proposed generic analytical framework for accurately evaluating call level quality of service (QoS) parameters of any kind of NGHMN implementing vertical handoff and different network selection strategies. Using this analytical framework, we estimate and compare the handoff rates and the blocking probabilities under a standard Exponential model, a general Gamma model and an accurate Hyper-exponential model of cell residence times in 3G cells and WLAN cells. Results show that given the different variabilities of the cell residence times, blocking probabilities under the Exponential model are over-estimated for 3G cells and largely under-estimated for WLAN cells. Besides these blocking probabilities are over-estimated under the Gamma model for WLAN cells.

In a second contribution of this thesis, we propose, analyze and validate an optimal voice admission control algorithm in a 3G/WLAN integrated network. We provide analytical models, validated by extensive computer simulations, for evaluating optimal admission control blocking performance under different wireless bandwidth allocation schemes for vertical handoff calls and under redefined dropping probabilities taking in account different coupling schemes. Performance results show that, compared to the tight coupling bandwidth allocation scheme, the loose coupling one provides a good mean to limit the

increase of blocking probabilities in expensive and high-loaded 3G cells when integrating both 3G and WLAN network. The proposed models can help network designers figure out the performance of an eventual type of integration between 3G and WLAN.

In a last contribution of this thesis, we evaluate the impact of mobility and soft handoff on the performance of optimal voice admission control in loosely coupled 3G/WLAN networks. For this purpose, we propose accurate mobility and wireless bandwidth allocation models taking in account the soft vertical handoff in this kind of NGHMN and we analyze the blocking probabilities of optimal voice admission control under different soft vertical handoff algorithms. Using these models, we show that an optimal resource-efficient soft handoff algorithm (RESHO) performs significantly better than a standard static-threshold soft handoff algorithm (STSHO) particularly in WLAN mobility environments. In fact, results show that 3G new call blocking probability reduction gained by using RESHO compared to STSHO is largely increased when mobile station (MS) velocities have low mean and high variability which typically characterizes the WLAN mobility environment. Besides, we show that RESHO reduces all blocking and dropping probabilities. We believe that the provided models and the presented results could help design efficient MS controlled soft vertical handoff algorithms for emergent loosely coupled 3G/WLAN networks.

Table des matières

Dédicace	iv
Remerciements	v
Résumé	vi
Abstract	viii
Table des matières	x
Liste des tableaux	xiv
Liste des figures	xv
Liste des sigles et abréviations	xvii
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Définitions et concepts de base	2
1.2 Éléments de la problématique	5
1.3 Objectifs de recherche	8
1.4 Esquisse méthodologique	8
1.5 Principales contributions escomptées	10
1.6 Plan de la thèse	13
CHAPITRE 2 GESTION DE LA QDS ET DES RESSOURCES DANS LES RMHPG	14
2.1 Caractéristiques des réseaux mobiles hétérogènes de prochaine génération .	15
2.1.1 Caractéristiques de la couverture sans fil	15

2.1.2	Les terminaux mobiles multi-mode	18
2.1.3	Les classes de service	20
2.1.4	L'architecture d'interconnexion	22
2.1.5	Mise en correspondance de la QoS bout en bout dans les RMHPG .	24
2.1.6	Types de relèves	24
2.2	Approches de contrôle d'admission dans les réseaux mobiles	25
2.2.1	Contrôle d'admission basé sur la grappe d'ombrage	26
2.2.2	Contrôle d'admission sur la capacité de garde	30
2.3	Contrôle d'admission et relèves verticales dans un RMHPG	35
2.3.1	Le contrôle d'admission dans les WLAN	35
2.3.2	Le contrôle d'admission dans un RMHPG	36
2.3.3	Priorités des relèves dans un RMHPG	38

CHAPITRE 3 CADRE GÉNÉRIQUE POUR LA MODÉLISATION ET L'ANALYSE

	DES PERFORMANCES D'UN RMHPG	41
3.1	Hypothèses et cadre de travail	42
3.1.1	Les classes de service	42
3.1.2	La QoS au niveau paquet	43
3.1.3	Modélisation de la mobilité	43
3.2	Modèles de mobilité non uniforme dépendant de la localisation	44
3.2.1	Modèle de mobilité dans les couvertures de type WLAN	45
3.2.2	Modèle de mobilité dans les couvertures de type 3G	47
3.2.3	Modèle de mobilité dans les couvertures de type 2.5G	47
3.2.4	Modèle de mobilité généralisé dans un RMHPG	48
3.3	Modèles de trafic et de capacité d'appels	49
3.3.1	Modèle de trafic d'appels	49

3.3.2	Modèle de capacité des cellules hétérogènes dans un RMHPG . . .	52
3.4	Les stratégies de sélection du réseau (SSR)	56
3.5	Extension du modèle de trafic généralisé à un RMHPG	58
3.6	Expression des probabilités de blocage dans un RMHPG	61
3.7	Estimation des taux de relèves et des probabilités de blocage pour notre modèle de RMHPG généralisé	68
3.8	Résultats analytiques et interprétations	73
3.8.1	Paramètres du RMHPG typique étudié	73
3.8.2	Convergence des taux de relèves	74
3.8.3	Effets de la distribution du TRC sur les performances du RMHPG .	78
3.9	Conclusion	81
 CHAPITRE 4 INTÉGRATION 3G/WLAN ET PERFORMANCES DU CONTRÔLE		
	D'ADMISSION OPTIMAL DE VOIX	82
4.1	Analyse du réseau 3G/WLAN intégré	82
4.1.1	Défis et motivations	83
4.1.2	Schémas d'intégration pour l'allocation des ressources radio aux appels en relève verticale	85
4.1.3	Modèle d'occupation de ressources et probabilités d'état à l'équilibre	88
4.1.4	Probabilités de blocage	89
4.1.5	Estimations des taux de relève	90
4.2	Contrôle d'admission optimal de voix dans un réseau 3G/WLAN intégré . .	92
4.2.1	Paramètres du problème d'optimisation	92
4.2.2	Formulation du contrôle d'admission optimal de voix dans un WLAN/3G intégré	94
4.2.3	Méthode de recherche de la capacité de garde optimale	95

4.3	Résultats analytiques, validations et interprétations	98
4.3.1	Paramètres de configuration du système 3G/WLAN	98
4.3.2	Validation du modèle analytique	98
4.3.3	Résultats de performance et interprétations	101
4.4	Conclusion	102
CHAPITRE 5 IMPACT DU SOFT HANDOFF SUR LES PERFORMANCES DU		
	CAC OPTIMAL DANS UNE INTÉGRATION FAIBLE 3G/WLAN	106
5.1	Modélisation du système	107
5.1.1	Modèle de mobilité multi-régions	107
5.1.2	Expression du temps de maintien de canal (TMC)	111
5.1.3	Expressions des probabilités de soft handoff	113
5.2	Algorithmes de soft handoff et analyse de performance	114
5.2.1	Le soft handoff standard STSHO	114
5.2.2	Le soft handoff efficace en utilisation de ressources RESHO	115
5.2.3	Analyse du temps de résidence pour RESHO vs. STSHO	117
5.3	Résultats de performance et interprétations	119
5.4	Conclusion	125
CHAPITRE 6 CONCLUSION		
6.1	Synthèse des travaux	127
6.2	Limitations des travaux	127
6.3	Indications de recherches futures	129
Bibliographie		131

Liste des tableaux

TABLEAU 2.1	Quelques caractéristiques des types d'accès sans fil hétérogènes . . .	18
TABLEAU 3.1	Paramètres du TRC caractérisant les cellules hétérogènes	74
TABLEAU 4.1	Paramètres du système 3G/WLAN	98
TABLEAU 5.1	Résumé des symboles les plus importants	119

Liste des figures

FIGURE 2.1	Interfaces radio dans une station mobile multi-mode	20
FIGURE 2.2	Couches protocolaires dans une station mobile multi-mode	21
FIGURE 2.3	Niveaux de couplage et schémas d'intégration dans un RMHPG	23
FIGURE 2.4	Facteurs de classification des relèves dans un RMHPG	25
FIGURE 2.5	Grappe d'ombrage pour la relève d'une station mobile	28
FIGURE 2.6	Relève verticale HMIPv6	39
FIGURE 3.1	Diagramme temporel pour les TRC $(t_1, \dots, t_{m+1})$, TMC $(r_1, \dots, r_m)$ et TMA t_c	51
FIGURE 3.2	Schéma d'accès restreint à la capacité pour les classes de service	57
FIGURE 3.3	Relèves obligatoires dans une stratégie de débordement	58
FIGURE 3.4	Modèle d'occupation de la capacité d'une cellule au niveau k	62
FIGURE 3.5	Trafic d'appels dans un RMHPG	71
FIGURE 3.6	Convergence des taux de relève sous divers modèles de TRC	76
FIGURE 3.7	Convergence des fonctions du point fixe pour les taux de relèves	77
FIGURE 3.8	Effet du modèle du TRC sur le blocage UMTS en fonction de la charge	79
FIGURE 3.9	Probabilité de blocage WLAN en fonction de la variabilité du TRC	79
FIGURE 4.1	Schémas d'intégration et de gestion des ressources du WLAN/3G	87
FIGURE 4.2	Schémas d'allocation de la capacité d'une cellule aux appels en relève verticale	88
FIGURE 4.3	Trafic d'appels dans un réseau WLAN/3G	91
FIGURE 4.4	Algorithme de recherche des paramètres du CAC optimal pour le 3G/WLAN	97

FIGURE 4.5	Validation des probabilités de blocage sous le CAC optimal	100
FIGURE 4.6	Probabilité de blocage en fonction du schéma d'intégration	103
FIGURE 4.7	Probabilité de coupure en fonction du schéma d'intégration	104
FIGURE 5.1	Les différentes régions dans une cellule 3G	108
FIGURE 5.2	Modèle de mobilité multi-régions dans une cellule 3G	110
FIGURE 5.3	Seuils RSS du WLAN pour le déclenchement de la relève	116
FIGURE 5.4	TRC dans la région de cœur/soft handoff en fonction de la vitesse .	120
FIGURE 5.5	Ratio de réduction de la probabilité de blocage au niveau 3G	121
FIGURE 5.6	Ratio de réduction de la probabilité de coupure globale	122
FIGURE 5.7	Probabilité de blocage WLAN pour STSHO vs. RESHO	124

Liste des sigles et abréviations

AAA	Authentication, Authorization and Accounting
AR	Access Router
MIPv6	Mobile IPv6 (RFC3775)
HMIPv6	Hierarchical Mobile IPv6
mSCTP	Mobile Streaming Control Transport Protocol
RMHPG	Réseaux Mobile Hétérogène de Prochaine Génération
NGHMN	Next Generation Heterogenous Mobile Network
CAC	Contrôle d'Admission de Connexion ou d'appel
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
CDMA	Code Division Multiple Access
TDMA	Time Division Multiple Access
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance
QoS	Qualité de Service
STSHO	Static Threshold Soft HandOver
RESHO	Resource Efficient Soft HandOver
TRC	Temps de Résidence Cellulaire
TMA	Temps de Maintien d'Appel
TMC	Temps de Maintien du Canal
SSR	Stratégie de Sélection du Réseau
WLAN	Wireless Local Area Network
CG	Capacité de Garde
CGF	Capacité de Garde Fractionnelle

CGFL	Capacité de Garde Fractionnelle Limitée
RSS	Received Signal Strength
DCH	Dedicated Channels
PCF	Point Coordination Function
DCF	Distributed Coordination Function
HCF	Hybrid Coordination Function
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
GPRS	General Packet Radio Service
MAP	Mobile Anchor Point

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

Ces dernières années, les réseaux mobiles ont connu un très grand succès avec une forte croissance du nombre d'utilisateurs mobiles utilisant plusieurs types de services sur divers types de réseaux mobiles. Ce succès a été réalisé malgré l'inexistence d'une technologie d'accès sans fil mobile qui peut à elle seule satisfaire tous les types de service. En effet, étant donné les problèmes inévitables des interférences radio, il n'existe et il n'existera probablement jamais une technologie sans fil mobile qui permettra par exemple de satisfaire en même temps une capacité élevée et une large couverture. Ainsi, dans le but de fournir de meilleurs services à un nombre d'utilisateurs sans cesse grandissant, il est possible d'intégrer les différentes technologies d'accès mobiles existantes et futures pour former le réseau d'accès hétérogène de ce qu'on appelle un réseau mobile hétérogène de prochaine génération ou RMHPG. Cette intégration des réseaux mobiles utilisant des technologies d'accès mobiles hétérogènes, chacune appropriée pour une couverture sans fil particulière, permettra d'offrir aux utilisateurs une mobilité ubiquitaire à moindre coût. Si l'ubiquité de l'accès mobile peut être réalisée en utilisant des architectures multi-accès interopérables et des protocoles standards supportant la mobilité, la réduction de coût, quant à elle, n'est pas une tâche facile pour les opérateurs mobiles. Elle doit en effet faire intervenir une gestion efficace des ressources onéreuses de bande passante sans fil tout en assurant des contraintes de qualité de service (QoS) dans des environnements mobiles très variables. Ainsi, la présente thèse a pour but principal d'apporter un ensemble de contributions originales au niveau des mécanismes d'allocation de la bande passante sans fil dans les RMHPG permettant d'améliorer leur efficacité et leur performance, tout en tenant compte de la mobilité et de la garantie de la QoS.

1.1 Définitions et concepts de base

Un réseau mobile hétérogène de prochaine génération (RMHPG) est un réseau mobile qui inter-connecte, selon une architecture d'intégration donnée, plusieurs réseaux d'accès sans fil mobiles utilisant diverses technologies d'accès existantes et futures. Certaines définitions d'un réseau mobile de prochaine génération l'associe à une technologie révolutionnaire offrant une capacité de transmission sans fil considérablement élevée par rapport aux technologies les plus récentes. Notre définition au contraire est celle d'un RMHPG permettant l'intégration flexible et efficace des différentes technologies d'accès mobiles existantes et facilitant leur évolution future ainsi que leur intégration avec de nouvelles et futures technologies d'accès. Un RMHPG global peut être vu aussi à l'image de l'Internet comme un grand pas vers un réseau mobile global d'interconnexion des divers réseaux mobiles existants et futurs. Dans cette thèse, nous nous limiterons aux réseaux mobiles opérant en mode infrastructure c'est-à-dire ceux qui utilisent une répartition cellulaire avec des points d'accès ou des stations de base desservant des cellules sur une couverture sans fil donnée. En effet, les réseaux mobiles Ad-Hoc, contrairement aux réseaux mobiles à infrastructure, ne permettent pas encore de garantir la qualité de service pour les appels de voix et utilisent souvent des mécanismes de gestion de ressources totalement différents de ceux utilisés dans les réseaux cellulaires. Rappelons que dans un réseau mobile à infrastructure, on appelle cellule la zone géographique élémentaire qui est délimitée par la portée de transmission du point d'accès ou de la station de base. Notons aussi que les stations mobiles profitant du RMHPG sont multi-mode c'est-à-dire qu'elles intègrent les multiples interfaces radio qui leur permettent de communiquer avec les différents réseaux mobiles hétérogènes intégrant le RMHPG.

À la date de la rédaction de cette thèse, la prochaine génération coïncide avec la quatrième génération (4G) qui englobe de nouvelles technologies d'accès telles que WiMax et

LTE. Toutefois, nous limitons notre étude à l'intégration des dernières technologies d'accès existantes 2.5G, 3G et WLAN en supposant que les réseaux de prochaines génération se distinguent beaucoup plus par l'évolution de l'architecture topologique globale du réseau. Ainsi dans cette thèse, nous développons des modèles génériques de gestion des capacités des réseaux mobiles existants et futurs intégrés dans un RMHPG. Et ces modèles génériques peuvent être combinées avec des modèles particuliers de capacité qui dépendent des types d'accès (GPRS, UMTS, WLAN, WiMax, LTE) et des types de canaux utilisés pour les appels (slots de temps, codes, sous-porteuses).

La qualité de service (QoS) est définie généralement comme étant "l'effet collectif des performances des services qui déterminent le degré de satisfaction de l'utilisateur" selon 3GPP (1999). Dans un RMHPG, cette même QoS doit être assurée sur deux niveaux : paquet et appel. Au niveau paquet, les paramètres de QoS sont le délai bout en bout, la gigue et les pertes de paquets. Au niveau appel, les paramètres de QoS sont le taux de coupure d'appel, le taux de blocage d'appel et le temps d'établissement d'appel qui sont souvent vus par l'utilisateur comme des caractéristiques de fiabilité du réseau. Cette fiabilité s'exprime dans ce cas par sa capacité à établir des appels avec succès et à supporter des communications sans coupures.

Les ressources dans un réseau de communications sont essentiellement les capacités de transmission des liens, les mémoires tampon et les capacités de traitement des nœuds. Dans un réseau mobile, la capacité de transmission du lien et particulièrement la bande passante sans fil est la ressource la plus critique à gérer pour garantir la QoS. En effet, le lien radio est toujours considéré comme le maillon faible de la chaîne de QoS bout en bout assurée sur un chemin de communication établi d'un nœud mobile à un nœud correspondant. Un flux de communication dans un RMHPG consomme une partie de la capacité sans fil du réseau d'accès ainsi que celle du réseau de transport d'interconnexion. Des mécanismes de "mapping de QoS", tels que proposés par Ben Ali *et al.* (2005), doivent être donc définis

aux points d'interconnexions pour assurer une correspondance et une cohérence entre les niveaux de QoS fournies par les deux types de réseaux, et garantir ainsi la continuité de la QoS bout-en-bout. Généralement, les ressources filaires sont assez abondantes et peu onéreuses, contrairement aux ressources sans fil qui restent encore relativement limitées et assez onéreuses. En effet, un réseau filaire peut bénéficier de la quasi-inexistence d'erreurs de transmission et d'une capacité très abondante grâce par exemple à l'utilisation de la fibre optique. Par contre, un réseau sans fil, quant à lui, souffre encore d'un nombre élevé de problèmes de transmission radio limitant sa capacité effective et incitant à déployer des solutions assez coûteuses pour contourner les interférences surtout sur des couvertures étendues. Étant donnée la très grande importance de la bande passante sans fil dans la garantie de QoS bout-en-bout dans un RMHPG, le concept de ressource va souvent référer dans cette thèse à ce type de bande passante.

Le contrôle d'admission d'appel ou de connexion (CAC) : Quelle que soit la technologie de transport utilisée dans un réseau de communications, une demande de service initiée par un client ou par une application donnée, que nous appelons *appel* ou *connexion* de manière équivalente, a besoin d'une quantité minimale de ressources pour satisfaire la QoS de cette demande sans provoquer la dégradation incontrôlable de la QoS des autres demandes. Contrairement aux services de données élastiques qui tolèrent une dégradation imprévisible de la QoS et dont le service "*best effort*" suffit généralement à leur fonctionnement, les services multimedia, telle que la voix ou la téléphonie vidéo, requièrent une garantie de QoS pour fonctionner correctement. Par conséquent, si le réseau de communications accepte de transporter des demandes de services multimedia sans contrôle sur la quantité de ressources consommées, alors il risque de dégrader la QoS de ces demandes d'une manière imprévisible. Par conséquent, des mécanismes de contrôle d'admission de connexion ou d'appel (CAC) doivent être implantés et renforcés pour chaque cellule du RMHPG afin de contrôler l'allocation et la consommation de sa capacité en nombre maximal d'appels

pouvant être servis en garantissant leur QoS au niveau paquet. Pour cela, un CAC opère en acceptant ou en refusant l'admission des appels généralement suivant des critères d'admission qui dépendent souvent du taux d'occupation de la capacité ou bien d'autres paramètres issus de certaines règles définissant certaines politiques d'admission.

La relève est la procédure qui permet à une station mobile de changer son point d'accès au réseau mobile : d'une station de base desservant la cellule courante à une autre station de base desservant une nouvelle cellule. On distingue entre une relève horizontale et une relève verticale. Une relève horizontale s'effectue entre cellules de même type de technologie d'accès dans un même réseau mobile homogène. Par contre, une relève verticale s'effectue entre cellules de types différents dans deux réseaux mobiles hétérogènes intégrant le RMHPG. Ces deux types de relèves sont possibles dans un RMHPG.

La capacité de garde (CG) est un paramètre d'admission définissant la politique de capacité de garde ou de bande de garde "guard band policy" très bien connue et largement implantée dans les réseaux cellulaires. Ce paramètre exprime la fraction de la capacité sans fil exclusivement réservée pour les appels en relève et dédiée à assurer la continuité de ces appels lors de la mobilité de l'utilisateur. Notons qu'un appel en relève est un appel en cours qui a été déjà établi par une station mobile et qui se trouve actuellement en procédure de relève.

1.2 Éléments de la problématique

Un réseau mobile hétérogène de prochaine génération (RMHPG) est la solution pour l'intégration des différents réseaux mobiles existants et futurs dans le but ultime d'offrir ubiquité et mobilité transparente et universelle pour l'utilisation d'un nombre illimité de services. Toutefois, ceci est loin d'être facile à réaliser avec un coût abordable étant donné que l'intégration des réseaux mobiles hétérogènes soulève un certain nombre de probléma-

tiques, particulièrement au niveau de la gestion des ressources onéreuses de bande passante sans fil pour garantir un niveau satisfaisant de QoS, surtout pour un service prioritaire de voix.

Premièrement, les modèles analytiques utilisés pour l'évaluation et l'ajustement des performances des réseaux mobiles d'anciennes générations ne sont pas adaptés à l'hétérogénéité des accès mobiles, à la diversification et à la variation des environnements de mobilité ainsi qu'à l'introduction de nouveaux types de relèves dans un RMHPG. En effet, il a été montré que le modèle exponentiel n'est plus valide pour certains types de réseaux mobiles et que, pour chaque type, il y a des modèles qui sont beaucoup plus adaptés que d'autres. De plus, la mobilité devient de plus en plus dynamique, variable et dépendante de la localisation, ce qui rend obsolète les modèles existants qui, généralement, ne tiennent pas compte de ces facteurs. D'un autre côté, les nouveaux types de relèves tels que les relèves verticales et particulièrement le soft handoff vertical s'effectuant entre différents types de réseaux mobiles ne sont pas considérés dans les modèles existants, ce qui rend l'évaluation de performance qui se base sur ces modèles irréalisable pour un RMHPG.

Deuxièmement, bien qu'il existe plusieurs architectures pour l'intégration des réseaux mobiles hétérogènes, chaque architecture ne permet pas d'offrir en même temps l'efficacité de l'utilisation des ressources et la flexibilité de l'intégration. En effet, l'utilisation d'une architecture d'intégration forte, comme nous allons le voir dans cette thèse, permet de déployer un contrôle d'admission centralisé très efficace dans l'allocation de la bande passante sans fil. Cependant dans cette architecture, l'interconnexion des réseaux mobiles doit se faire au niveau des équipements propriétaires de l'accès radio implantant des protocoles spécifiques à chaque technologie utilisée. Par conséquent, cette architecture d'intégration forte, qui ne se base pas sur le protocole standard de l'Internet (IP), limite significativement l'interopérabilité et l'interconnexion de différents opérateurs mobiles hétérogènes. D'un autre côté, il est bien connu que l'utilisation d'une architecture d'intégration faible au

niveau des équipements de routage IP permet de bénéficier d'une flexibilité et d'une facilité d'interopérabilité entre différents opérateurs au prix d'une perte d'efficacité d'allocation de ressources de bande passante sans fil.

Troisièmement, le contrôle d'admission optimal standard permettant d'optimiser l'utilisation de la bande passante sans fil tout en satisfaisant les contraintes de QoS n'est plus adapté à un RMHPG. En effet, un appel qui se trouve par exemple face à un échec de relèvement horizontal dans un réseau mobile donné peut être récupéré d'une coupure imminente, grâce à l'introduction des relèvements verticaux, par un autre réseau mobile intégré dans l'architecture du RMHPG. Ainsi le contrôle d'admission optimal standard ne tenant pas compte des appels en relèvement vertical surestime les probabilités de coupure d'appel dans leur contraintes de QoS, ce qui dégrade l'efficacité de l'utilisation de la bande passante sans fil.

Finalement, l'utilisation de l'architecture flexible d'une intégration faible ne permet pas facilement d'avoir simultanément la garantie de la QoS au niveau appel et la garantie de la QoS au niveau paquet lors de la procédure de relèvement. En effet, la relèvement vertical dans ce type d'intégration faible a une latence très élevée, ce qui dégrade significativement la QoS au niveau paquet des appels de voix lors de cette relèvement. L'introduction du soft handoff permet d'améliorer la QoS au niveau paquet lors de cette relèvement vertical au prix d'une dégradation éventuelle de la QoS au niveau appel si un algorithme de soft handoff standard est utilisé. Plus d'explications sur tous ces éléments de problématique vont être présentées et détaillées dans les différents chapitres de cette thèse avec des références et des résultats de performance.

1.3 Objectifs de recherche

L'objectif principal de cette thèse est de proposer de nouveaux modèles et algorithmes pour le contrôle d'admission optimal et l'allocation efficace de la bande passante sans fil qui sont beaucoup plus précis et plus adaptés à n'importe quel RMHPG.

De manière plus spécifique, cette thèse vise à :

- Recenser les caractéristiques typiques et spécifiques à un RMHPG et qui peuvent largement influencer l'analyse de performance réalisée en utilisant les modèles analytiques existants ;
- Proposer de nouveaux modèles analytique de mobilité et d'allocation de bande passante sans fil qui sont assez génériques pour être utilisés avec n'importe quelle combinaison de différents types d'accès mobiles ; Ces nouveaux modèles doivent être aussi assez précis pour donner les performances exactes qui tiennent compte des spécificités d'un RMHPG au niveau de la mobilité, de la couverture radio, des relèves verticales, du soft handoff vertical, du type d'intégration, etc.
- Proposer un algorithme de recherche des paramètres optimaux du contrôle d'admission redéfini pour un RMHPG typique intégrant réseau WLAN et réseau 3G ;
- Analyser et évaluer les métriques de QoS au niveau appel d'un RMHPG intégré selon différents schémas d'intégration et sous différents algorithmes de soft handoff ; Cette évaluation se fait analytiquement en utilisant les modèles et les algorithmes proposés et doit être validée par simulations à événements discrets.

1.4 Esquisse méthodologique

Pour atteindre nos objectifs, nous suivons les étapes suivantes. Dans un premier temps, nous analyserons les approches existantes utilisées pour résoudre les problèmes de gestion de la bande passante sans fil dans les réseaux mobiles. Pour cela, nous passerons en revue

les travaux les plus récents traitant le sujet et nous analyserons leurs limitations. Nous recenserons également les caractéristiques d'un RMHPG qui doivent être prises en compte lors de sa modélisation.

Dans une deuxième étape, nous développerons des modèles de mobilité et des modèles d'occupation de bande passante sans fil généralisés qui peuvent être adaptés à n'importe quelle combinaison de réseaux mobiles hétérogènes intégrés dans un RMHPG. Nous utiliserons des distributions généralisées et des stratégies de sélection de réseau génériques dans un cadre de modélisation très paramétrable avec les différents détails caractérisant chaque RMHPG particulier. Pour les modèles de mobilité, nous adopterons des méthodes analytiques basées sur le développement de processus stochastiques représentant les arrivées des appels ainsi que sur des variables aléatoires représentant les différentes durées (durée d'occupation de la bande passante, durée d'occupation de la cellule, durée des appels, etc.) et cela pour chaque classe d'appels. Nous n'utiliserons pas de méthodes de simulation pour les modèles de mobilité puisqu'elles sont généralement très complexes à manipuler quand on considère des topologies à grandes couvertures réseau avec un nombre important d'utilisateurs. Par contre, nous utiliserons des méthodes de simulation pour valider les modèles d'occupation de bande passante et les algorithmes d'estimation numériques des probabilités de blocage. Notons que pour les modèles d'occupation de la bande passante sans fil, nous adopterons une approche analytique de développement des différentes expressions des probabilités d'état à l'équilibre issues d'une modélisation du système par des chaînes de Markov à plusieurs dimensions.

En troisième étape, nous utiliserons l'approche analytique par processus stochastiques pour développer des modèles d'occupation de bande passante sans fil pour différents schémas d'intégration dans un réseau 3G/WLAN intégré. En outre, nous formulerons le problème de contrôle d'admission dans un réseau 3G/WLAN intégré comme un problème d'optimisation continue à fonction objective non linéaire. Nous développerons un algo-

rithme de recherche itératif pour trouver la solution optimale à ce problème.

En quatrième étape, nous utiliserons un modèle analytique de puissance de signal reçu pour développer un modèle de soft handoff vertical et analyser les performances qui en découlent en adaptant significativement les modèles de mobilité et d'occupation de bande passante précédemment établis à ce nouveau type de soft handoff dans un réseau 3G/WLAN intégré selon un schéma d'intégration faible.

Nous comparerons les résultats numériques de performance du RMHPG donnés par les différents modèles et algorithmes en termes de probabilités de blocage et cela en fonction des différents paramètres du système (schéma d'intégration, paramètres de soft handoff, variabilité de la mobilité, vitesse moyenne de la station mobile et sa variabilité, etc.). En outre, nous utiliserons des modèles de simulation à événements discrets pour valider les résultats analytiques.

1.5 Principales contributions escomptées

Cette thèse fait état de trois principales contributions :

Plusieurs modèles ont été proposés dans la littérature pour l'analyse et l'évaluation de la QoS au niveau appel dans les réseaux mobiles à couvertures radio hiérarchiques. Toutefois, aucun de ces modèles ne tient compte des nouvelles capacités et des caractéristiques hétérogènes d'un RMHPG d'une manière aussi complète et précise que celle adoptée dans cette thèse. En effet, cette thèse fait état de trois principales contributions : un cadre analytique générique et précis pour l'évaluation de la QoS au niveau appel de n'importe quel RMHPG ; un modèle d'évaluation des performances du contrôle d'admission optimal de voix dans un réseau WLAN/3G intégré selon différents schémas d'intégration ; un modèle de soft handoff vertical permettant d'évaluer avec précision accrue son impact sur les performances du contrôle d'admission optimal de voix dans un réseau WLAN/3G faiblement

intégré.

Dans une première contribution, le cadre analytique que nous proposons tient compte des nouvelles capacités d'un RMHPG à supporter les relèves verticales et les stratégies de sélection du réseau. Il tient compte également des caractéristiques hétérogènes du RMHPG telles que la diversification des environnements de mobilité et l'hétérogénéité des couvertures hiérarchiques à étendues variées. En outre, contrairement aux modèles existants, notre cadre analytique se distingue par sa généralité et sa précision. En effet, cette généralité apparaît dans trois éléments essentiels. Premièrement, notre cadre analytique est capable de modéliser n'importe quel RMHPG intégrant un nombre quelconque de niveaux de couvertures radio hétérogènes. Les modèles utilisés dans la littérature se limitent souvent à deux niveaux homogènes. Deuxièmement, nos modèles utilisent des distributions Gamma connues par leur caractère général dans la capture de n'importe quel temps de résidence cellulaire (TRC). Ceux dans la littérature utilisent souvent des distributions Exponentielles. Troisièmement, notre cadre analytique permet de modéliser n'importe quelle stratégie de sélection de réseau. Ceux dans la littérature se limitent à intégrer une stratégie particulière. Quant à la précision fournie par nos modèles, elle est réalisée grâce à trois éléments. Premièrement, notre cadre analytique utilise des distributions de TRC beaucoup plus précises pour certains environnements de mobilité. Particulièrement, dans un environnement WLAN, le TRC dans une cellule WLAN a été capturé, analysé et montré suivre une distribution à queue lourde. Dans notre travail, nous montrons l'importance d'utiliser la distribution hyper-exponentielle pour le WLAN puisque les autres distributions telles que Gamma et exponentielle donnent des résultats de performance très différents. Deuxièmement, nous distinguons entre classe de nouveaux appels et classe d'appels en relève dans le temps de maintien du canal. Et troisièmement, nous estimons les différents taux de relèves horizontales et les différents taux de relèves verticales au lieu de les fixer comme paramètres d'entrées comme dans la plupart des modèles existants.

Plus particulièrement dans cette contribution nous nous intéressons à un RMHPG typique intégrant réseau WLAN, réseau 3G et réseau 2.5G. Les modèles existants dans la littérature pour ce type de RMHPG considèrent le WLAN comme un "hotspot" sans relèves horizontales. Toutefois, grâce au support récent de la relève rapide WLAN pour les appels de voix et dans le but de profiter du faible coût du réseau WLAN, nous tenant compte dans notre modèle des relèves horizontale WLAN. De plus, nous modélisons la rupture de la couverture qui déclenche automatiquement des relèves verticales vers les réseaux cellulaire en superposition.

Dans une deuxième contribution, nous modélisons et comparons les performances de divers schémas d'allocation de bande passante pour les appels en relèves verticales dans un réseau typique WLAN/3G intégré suivant plusieurs types de couplages. Notre modèle tient compte des paramètres optimaux de contrôle d'admission permettant de minimiser le taux de blocage sujet à un faible taux de coupure d'appels. Ceci constitue une approche novatrice dans l'étude des performances de ces schémas d'intégration. En effet, grâce à cette contribution le planificateur WLAN utilisera notre modèle pour estimer les performances plus réelles données par chaque schéma d'intégration et d'allocation de bande passante sans fil pour les appels en relève verticale. Ensuite il décidera quel schéma adopter pour rencontrer les performances désirées.

Dans une troisième contribution nous proposons un nouveau modèle permettant d'analyser et comparer avec précision accrue les mécanismes de soft handoff vertical. Ceci constitue un travail innovateur. Nous estimons le gain en taux de blocage dans le réseau 3G et en taux de coupure d'appel réalisé en utilisant un algorithme de soft handoff vertical consommant efficacement la bande passante sans fil onéreuse du réseau 3G au lieu d'un algorithme standard. L'estimation de ce gain est effectuée dans plusieurs environnements de mobilité, i.e. en fonction des paramètres de mobilité telle que la moyenne et la variabilité de la vitesse des stations mobiles multi-mode. Grâce à cette contribution, le planificateur

du réseau WLAN utilisera notre modèle pour estimer les performances données par un soft handoff vertical optimal. Ensuite il décidera si le gain apporté par ce dernier en terme de taux de blocage 3G est assez significatif pour considérer son implémentation complexe.

1.6 Plan de la thèse

La suite de cette thèse est organisée de la manière suivante :

Le deuxième chapitre fournit une caractérisation complète des RMHPG. Ensuite, il passe en revue les différentes approches de contrôle d'admission pour le support de la QoS au niveau appel dans les réseaux mobiles en général et analyse les limitations de chacune de ces approches. Le troisième chapitre propose un cadre générique pour la modélisation et l'analyse des performances de n'importe quelle combinaison de réseaux mobiles hétérogènes intégrant un RMHPG. Plus précisément, des modèles de mobilité et des modèles d'occupation de bande passante sans fil généralisés sont proposés pour une étude plus précise des probabilités de blocage dans un RMHPG. Le quatrième chapitre propose un modèle d'allocation de bande passante sans fil et un algorithme de recherche des paramètres optimaux du contrôle d'admission adaptés pour un réseau 3G/WLAN intégré selon différents schémas d'intégration. Et cela dans le but d'étudier l'impact de l'intégration sur les performances du contrôle d'admission optimal de voix. Dans le cinquième chapitre, nous proposons un modèle de soft handoff contrant la dégradation de la QoS au niveau paquet lors du processus très lent de relève verticale dans un réseau 3G/WLAN faiblement intégré et nous étudions l'impact de l'algorithme du soft handoff sur les performances du contrôle d'admission optimal de voix. Le sixième et dernier chapitre conclut les travaux effectués dans cette thèse, présente leurs limitations et soulève les problèmes ouverts non encore résolus.

CHAPITRE 2

GESTION DE LA QDS ET DES RESSOURCES DANS LES RMHPG

Un réseau mobile hétérogène de prochaine génération (RMHPG) soulève encore des problématiques majeures au niveau du provisionnement d'une QdS à coût abordable pour les services de communications temps-réel ainsi qu'au niveau du support d'une mobilité transparente et sans coupures à travers les différents réseaux mobiles hétérogènes qui l'intègrent. Un RMHPG se caractérise essentiellement par l'intégration flexible et efficace de différents accès sans fil mobiles hétérogènes existants et futurs, le support de la QdS pour des services multimedia à contraintes temps réel ainsi que la mobilité de l'utilisateur qui devient de plus en plus dynamique et variable. Toutes ces caractéristiques nécessitent la reconsideration des mécanismes standards de gestion de la QdS et des ressources qui sont souvent implantés séparément dans chaque type de réseau d'accès sans fil mobile. Dans ce contexte, la mise en correspondance de la QdS entre accès hétérogènes et réseau IP d'interconnexion ainsi que la gestion de la bande passante sans fil au niveau de chacun de ces accès constituent des mécanismes primordiaux sans lesquels la QdS de bout en bout ne peut être assurée. Particulièrement, le contrôle d'admission de connexion (CAC) dans les réseaux mobiles constitue le mécanisme essentiel pour la gestion efficace des ressources dispendieuses et très limitées de bande passante sans fil dans les différents accès hétérogènes.

Dans une première section de ce chapitre, nous présentons les principales caractéristiques des RMHPG qui devraient être prises en compte lors de la conception de nouveaux algorithmes CAC adaptés à ce type de réseaux. Ensuite, dans une deuxième section, nous nous intéressons au contrôle d'admission et aux relèves dans un RMHPG de type WLAN/3G/2.5G intégré. Dans une troisième section nous recensons les différentes

approches de conception d'un CAC en présentant leur limitations. Et dans une dernière section nous concluons le présent chapitre.

2.1 Caractéristiques des réseaux mobiles hétérogènes de prochaine génération

L'évolution des réseaux mobiles à travers les générations a été essentiellement guidée par l'implantation de nouvelles technologies d'accès sans fil permettant non seulement de fournir une nouvelle panoplie de services multimedia exigeants en QoS mais aussi d'augmenter la capacité sans fil afin de supporter un nombre sans cesse grandissant d'utilisateurs mobiles. Ainsi l'existence de différents types d'accès sans fil dans l'architecture d'un réseau mobile de prochaine génération dans un contexte d'intégration d'accès hétérogènes, induit une combinaison des caractéristiques des accès individuels ainsi que des caractéristiques découlant de l'architecture d'intégration. Ces caractéristiques sont détaillées dans ce qui suit.

2.1.1 Caractéristiques de la couverture sans fil

Généralement, les ressources de bande passante sans fil sont réparties sur une certaine couverture géographique qui est définie lors de la phase de planification du réseau mobile, de différentes manières. Celles-ci dépendent de plusieurs paramètres tels que la densité des différentes régions géographiques, les besoins de mobilité et la demande à satisfaire en services et en nombre d'utilisateurs.

La macro-diversité et le soft handoff

La macro-diversité de la couverture sans fil permet à une unité mobile de transmettre et/ou recevoir le même signal radio sur plusieurs stations de base simultanément et sur une même fréquence. Cette caractéristique de macro-diversité permet d'implanter le méca-

nisme de soft handoff entre stations de base opérant sur la même fréquence. Ce mécanisme est bien connu dans les réseaux mobiles 3G utilisant l'accès multiple par répartition de code (CDMA et WCDMA). Dans Viterbi *et al.* (1994), on a montré que la macro-diversité permet d'améliorer la capacité sans fil d'un système CDMA en réduisant les interférences inter cellules opérant sur la même fréquence. Les futurs réseaux mobiles 4G se basant sur l'accès multiple par répartition orthogonale de fréquence (OFDMA) utilisent la technique de réseau à simple fréquence dynamique (DSFN) pour implanter la macro-diversité sans fil. D'un autre côté, plusieurs stations de base WLAN peuvent utiliser la même fréquence non seulement pour fournir plus de robustesse et de couverture, mais aussi pour fournir cette macro-diversité.

La hiérarchie cellulaire

Dans ce modèle de hiérarchie cellulaire, la couverture est composée d'un recouvrement de cellules sur plusieurs niveaux utilisant la même technologie d'accès sans fil mais avec des tailles et fréquences différentes. En effet, dans le but d'améliorer la capacité du réseau cellulaire et accommoder un nombre grandissant d'utilisateurs mobiles, la taille des cellules peut être réduite dans les régions géographiques denses. Ainsi, dans ce type de régions le taux de réutilisation de la même fréquence augmente pour un accès 2G-TDMA alors que la puissance de transmission et les interférences sont réduites pour un accès 3G-CDMA ayant un taux de réutilisation fréquentielle unitaire. Dans le but de contourner la difficulté de supporter des utilisateurs très mobiles sur des cellules de petites tailles appelées micro-cellules ou pico-cellules, à cause d'un taux de relèvement assez élevé, d'autres cellules de tailles plus grandes appelées macro-cellules recouvrent généralement les cellules de petites tailles afin d'accommoder ce type d'utilisateurs à vitesses élevées. La plupart des utilisateurs à vitesses réduites vont consommer les ressources des micro-cellules ou pico-cellules alors que le reste des utilisateurs à vitesses élevées vont consommer les ressources des macro-

cellules. Plus généralement, la couverture sans fil adoptant cette hiérarchie cellulaire se décompose en macro-cellules offrant une faible capacité sur toute la couverture s'étendant jusqu'aux régions suburbaines et rurales, des micro-cellules offrant une capacité modérée dans les régions urbaines, et des pico-cellules offrant une capacité assez élevée dans les régions urbaines très denses. Ce modèle hiérarchique est défini ainsi du fait que dans les réseaux cellulaires, la capacité d'une cellule est généralement inversement proportionnelle à sa taille.

Le recouvrement des accès hétérogènes

Pour concevoir un réseau mobile de prochaine génération, il n'existe aucune technologie d'accès au medium sans fil qui peut, à elle seule, fournir une bonne capacité de transmission, une ubiquité et une continuité de la communication sans fil sur une couverture universelle globale. De ce fait, un RMHPG définit une nouvelle approche dans la conception d'un réseau mobile de prochaine génération qui se base sur l'intégration de plusieurs types de technologies d'accès sans fil. En effet, il est fort probable que la plupart des régions géographique urbaines soient recouvertes de plusieurs réseaux d'accès sans fil utilisant plusieurs technologies. Et de ce fait un RMHPG n'utilisera pas un seul type d'accès mais une multitude de technologies d'accès hétérogènes de façon intelligente fournissant ainsi une itinérance transparente de l'utilisateur entre différents systèmes complètement hétérogènes. Un RMHPG intègre plusieurs types d'accès, chacun adapté à une couverture particulière, offrant une certaine capacité de transmission et adapté à un certain nombre de services particuliers. Parmi les types d'accès sans fil les plus répandus qui sont utilisés dans des réseaux mobiles et qui peuvent facilement être intégrés grâce à une architecture d'interconnexion utilisant le protocole Internet (IP), nous citons :

- L'accès satellite qui permet d'offrir une couverture quasi-planétaire et une mobilité globale au prix d'une très faible capacité de transmission et un signal très faible dans

les environnements intérieurs ;

- L'accès 2.5G selon les standards GPRS ou EDGE par exemple qui permet d'offrir une couverture urbaine et suburbaine à faible capacité de transmission ;
- L'accès 3G selon les standards UMTS ou HSDPA par exemple qui permet d'offrir une couverture urbaine à capacité de transmission relativement élevée ;
- L'accès WLAN selon les standards IEEE 802.11g,a par exemple qui permet d'offrir une couverture très limitée à capacité de transmission élevée ;
- L'accès WiMax selon les standards IEEE 802.16e par exemple qui permet d'offrir une couverture assez élevée à capacité de transmission modérée comparable à celle du DSL/câble.

TABEAU 2.1 Quelques caractéristiques des types d'accès sans fil hétérogènes

Type d'accès	Ex. de standards	Accès multiple	Taille d'une cellule
Satellite	VSAT	FDMA, TDMA	2900-25000m
2G	GSM, GPRS	TDMA	600-5000m
3G	UMTS, HSDPA	(W)CDMA	250-4000m
WLAN	IEEE 802.11b,g,a	CSMA/CA	30-150m
WiMax	IEEE 802.16d,e	(MIMO-)OFDMA	10000-50000m
4G	HSOPA, LTE	MIMO-OFDMA	5000-30000m

2.1.2 Les terminaux mobiles multi-mode

Différentes technologies d'accès radio ont été développées afin de satisfaire différents besoins de connectivité à divers types de réseaux sans fil : des réseaux personnels (WPAN tel que Bluetooth) aux réseaux satellites en passant par les réseaux locaux (WLAN tel que IEEE 802.11b/g), les réseaux métropolitains (WMAN tel que WiMax/IEEE802.16e) et les très populaires réseaux cellulaires étendus (WWAN tel que GSM/EDGE, W-CDMA, ou CDMA2000). Dans le but de bénéficier de cette hétérogénéité de l'environnement radio, deux besoins sont exprimés lors de la conception des terminaux mobiles pouvant tirer profit

des RMHPG :

- Les équipements usager (modem GPRS, carte sans fil IEEE 802.11, etc.) doivent être supportés dans un même terminal mobile et doivent inter-fonctionner pour délivrer à l'équipement terminal les services d'accès au réseau approprié dépendamment de la disponibilité de ce dernier ainsi que des préférences de l'utilisateur ;

- L'équipement usager doit être capable de détecter dynamiquement les technologies d'accès radio disponibles ainsi que les ressources de bande passante sans fil disponibles et de les utiliser d'une manière intelligente permettant d'améliorer l'efficacité de l'utilisation de ces ressources.

Il est possible de classer deux types de terminaux mobiles multi-mode dans un RMHPG : ceux qui utilisent plusieurs interfaces radio séparément illustré à la Figure 2.1a et ceux qui utilisent une seule interface radio cognitive illustré à la Figure 2.1b. L'architecture en couches diffère que l'on soit dans un type ou dans un autre. Pour les terminaux multi-mode à interfaces radio multiple, la convergence des technologies d'accès hétérogènes se fait au niveau de la couche transport avec des protocoles tels que le protocole Internet Mobile ou sa version optimisée HMIPv6 (SOLIMAN *et al.*, 2005) ou encore le protocole de transmission et de contrôle de flux mobile mSCTP (Koh *et al.*, 2004) tel qu'illustré à la Figure 2.2a. Pour les terminaux multi-mode à interface radio cognitive qui sont beaucoup plus futuristes, la convergence des technologies d'accès hétérogènes se fait au niveau de la couche radio qui est munie d'une intelligence logicielle lui permettant de reconnaître, sélectionner et reconfigurer le matériel radio (antennes, multiplexeurs, convertisseurs, etc.) adéquat pour utiliser le lien radio le plus adapté, comme le montre la Figure 2.2b.

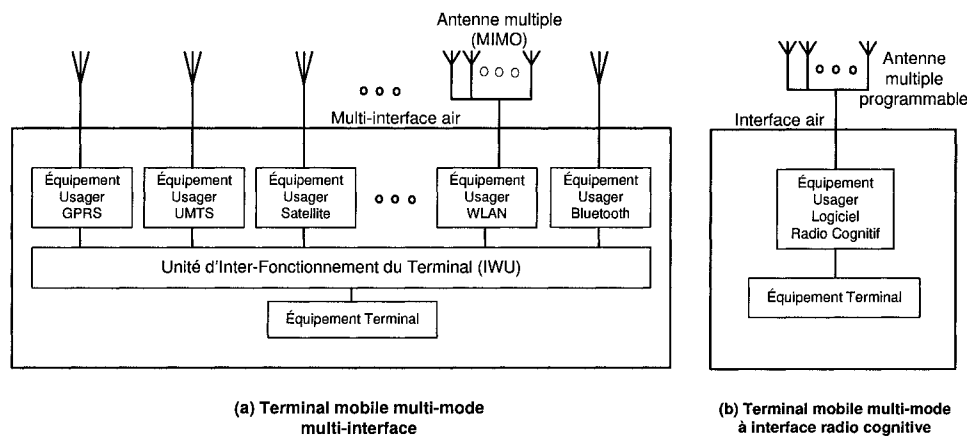
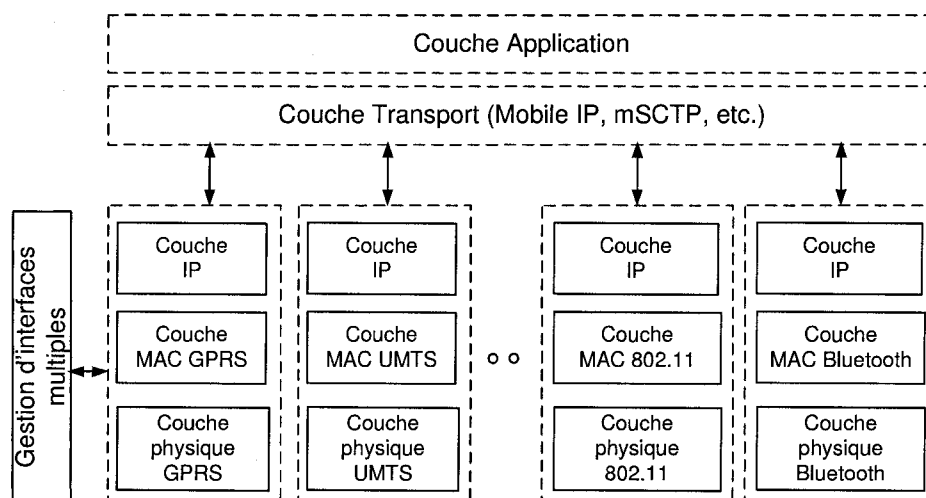


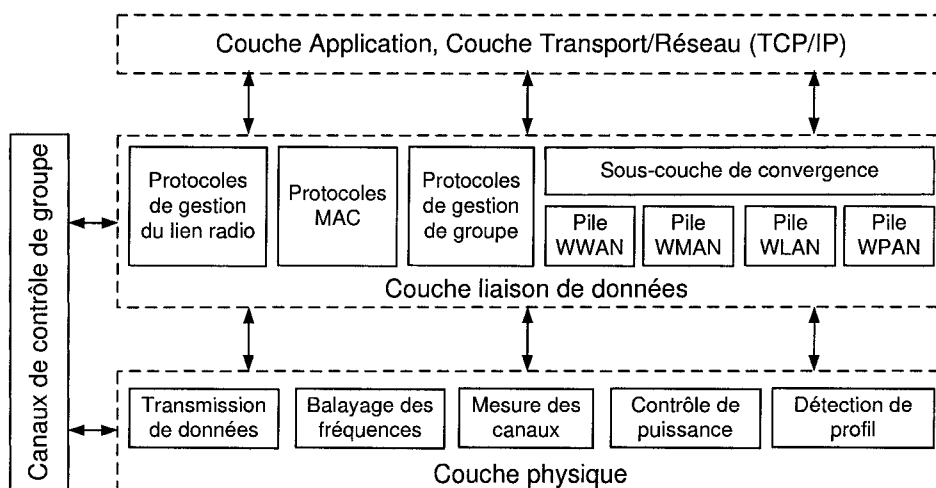
FIGURE 2.1 Interfaces radio dans une station mobile multi-mode

2.1.3 Les classes de service

Rappelons que les anciennes générations des réseaux mobiles n'offraient que le service de voix et éventuellement des services rudimentaires de messagerie courte. La nouvelle génération des réseaux mobiles permettra d'offrir une vaste gamme de services multimédia essentiellement basés sur la commutation de paquets IP qui est considérée encore comme un transport best effort comparativement à la commutation de circuits, malgré tous les efforts de support et de gestion de QoS dans les réseaux IP (DiffServ, RSVP, MPLS). Comme cette commutation de paquets IP nécessite l'implantation de mécanismes particuliers pour le support de la QoS, il faut définir pour chacun de ses mécanismes l'ensemble des classes de service qui seront traitées de manière différentes pour assurer leur qualité. Voix sur IP, vidéo-téléphonie, vidéo-conférence, vidéo sur demande, Web radio, jeux en ligne, navigation web, messagerie instantanée et courriels ne sont qu'un échantillon de l'ensemble des services pouvant être offerts par un RMHPG. Bien qu'ils peuvent utiliser le même type de réseau de transport IP, ces services diffèrent par leur niveau d'exigence en QoS. Si on



(a) Architecture en couches dans un terminal mobile multi-mode multi-interfaces



(b) Architecture en couches générique dans un terminal mobile multi-mode à interface radio cognitive

FIGURE 2.2 Couches protocolaires dans une station mobile multi-mode

se réfère aux différentes recommandations et spécifications de l'ITU et du projet de partenariat des réseaux de troisième génération (3GPP), différentes classes de service ont été définies en fonction de leur sensibilité au délai du réseau et à la variation de ce délai aussi appelée gigue. Par exemple, 3GPP a défini 4 classes de service qui sont, du plus sensible au moins sensible au délai : la classe conversationnelle englobant les services de téléphonie et de vidéo-conférence, la classe streaming audio et vidéo, la classe interactive incluant les services de navigation Web, et la classe d'arrière-plan contenant les services de téléchargements, de messagerie courte, de courriel, etc. Notons que, malgré le fait que plusieurs autres paramètres de QoS au niveau paquet doivent être garantis, le délai reste le paramètre le plus critique à garantir par le CAC dans un RMHPG et par conséquent on donne souvent la priorité la plus élevée pour l'accès à la bande passante sans fil du RMHPG aux appels de voix de la classe conversationnelle.

2.1.4 L'architecture d'interconnexion

Un réseau mobile donné est généralement construit selon une architecture qui le décompose en un réseau d'accès et un réseau de cœur. Le réseau d'accès englobe les noeuds implantant les protocoles de couche liaison de données sans fil et filaire et le réseau de cœur englobe les noeuds routeurs implantant généralement les protocoles de la couche réseau. L'interconnexion de plusieurs réseaux mobiles de technologies d'accès hétérogènes peut se faire à différents niveaux de cette architecture type. Tel qu'il est illustré à la Figure 2.3, si l'interconnexion formant le RMHPG se fait au niveau des noeuds des différents réseaux d'accès, nous parlons d'une *intégration ou couplage fort*. Si cette interconnexion se fait au niveau des noeuds des différents réseaux de cœur, nous parlons dans ce cas d'une *intégration ou couplage faible*. Si l'interconnexion se fait au niveau des noeuds passerelles interconnectant les réseaux de cœur à des réseaux externes tels que l'Internet, nous parlons

alors d'une *intégration ou couplage très faible*.

Bien que le couplage fort dans un RMHPG utilisant souvent un contrôle d'admission centralisé hybride bien adapté permet de fournir une bonne efficacité dans l'allocation des ressources, ce type de couplage ne permet cependant pas de fournir la flexibilité et l'évolutivité offerte par un couplage faible. En effet, le couplage faible, contrairement au couplage fort, permet l'intégration de plusieurs réseaux mobiles appartenant à des opérateurs distincts ou encore utilisant des technologies d'accès futures puisque l'interconnexion se basant sur le protocole Internet (IP) se fait assez facilement au niveau des noeuds de routage, permettant ainsi l'interopérabilité des équipements réseau.

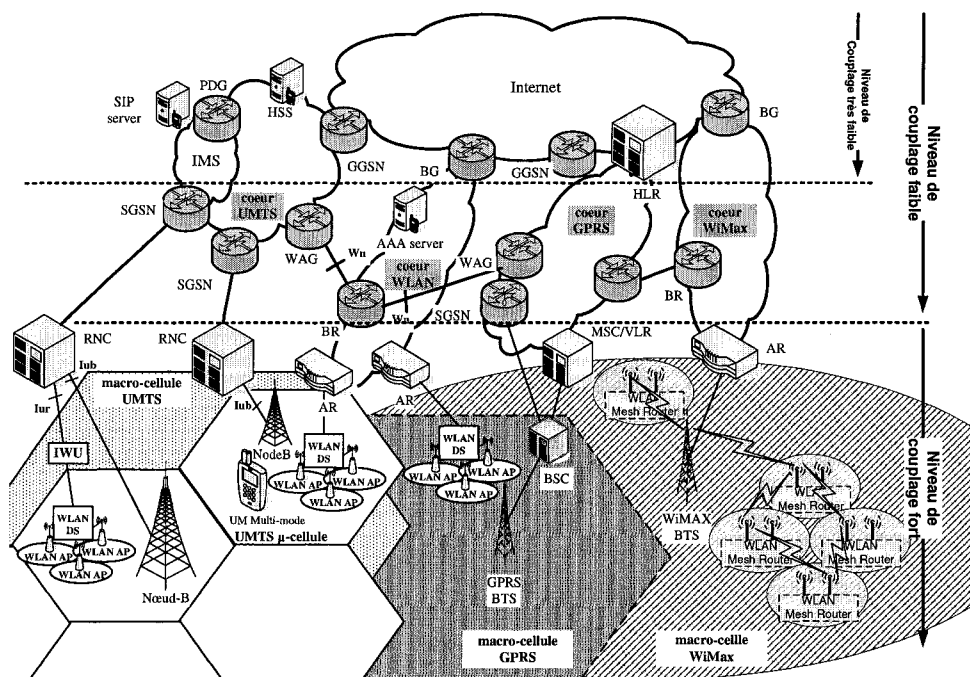


FIGURE 2.3 Niveaux de couplage et schémas d'intégration dans un RMHPG

2.1.5 Mise en correspondance de la QoS bout en bout dans les RMHPG

Généralement, chaque type d'accès possède sa propre définition des classes de service dépendamment des priorités d'accès et des tolérances aux paramètres de QoS. L'interconnexion des accès hétérogènes à travers une dorsale IP formant ainsi le RMHPG soulève un problème de cohérence de la QoS tout au long d'un chemin de communication d'un appel donné. Pour résoudre ce problème, un mécanisme de correspondance de QoS entre chaque accès et la dorsale IP doit être défini. Dans les réseaux mobiles 3G sous le standard UMTS, quatre classes de services sont définies et doivent être "mappées" ou mises en correspondance avec les classes de service de l'architecture la plus adéquate (Ben Ali *et al.*, 2004) à une dorsale IP d'interconnexion qui se trouve être l'architecture DiffServ de l'IETF. Une mise de correspondance distinguant entre flux de voix et de vidéo, améliorant ainsi les performances des services de voix critiques, a été définie dans Ben Ali *et al.* (2005). Cette même approche peut être appliquée à des réseaux d'accès de natures différentes afin d'assurer la continuité de la QoS de bout-en-bout.

2.1.6 Types de relèves

Les relèves dans un RMHPG peuvent être classifiées en se basant sur plusieurs facteurs comme illustré à la Figure 2.4. Notons que les accès de type CDMA dans les réseaux mobiles de troisième génération ont permis d'introduire le nombre de connexions comme facteur distinguant hard handoff et soft handoff. La hiérarchie cellulaire en macro, micro et pico cellules a permis d'introduire le facteur de fréquences engagées. Un autre facteur a été introduit pour distinguer entre les relèves contrôlées/initiées par la stations mobiles et celles contrôlées/initiées par le réseau. L'ouverture des réseaux à d'autres opérateurs en utilisant des contrats de service d'itinérance a permis d'introduire le facteur de domaines administratifs impliqués. Quant à la caractéristique essentielle des RMHPG qui est l'in-

tégration des réseaux mobiles, elle a permis d'introduire le facteur de types de réseaux d'accès impliqués pour distinguer entre relèves horizontales et relèves verticales.

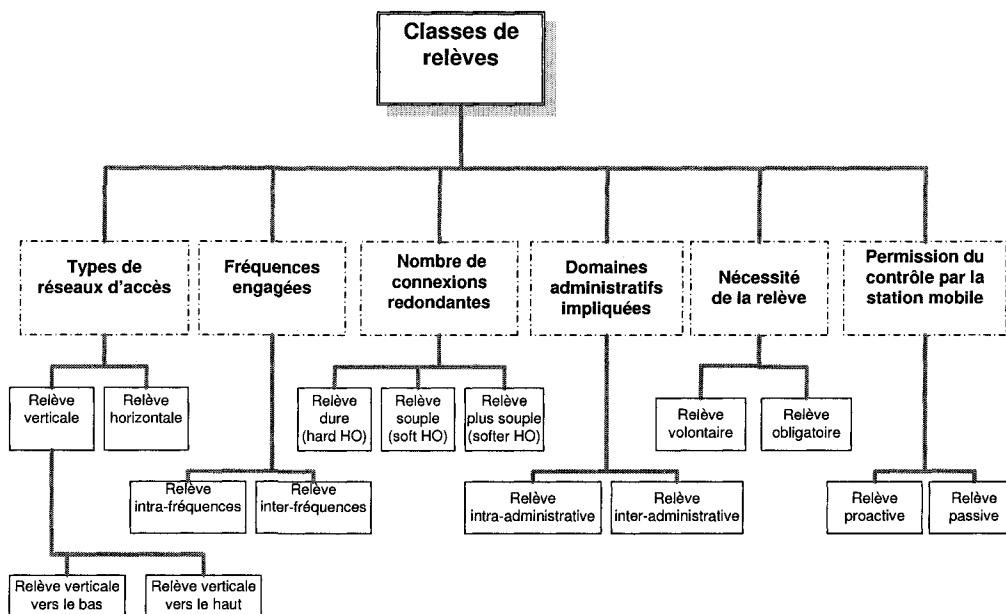


FIGURE 2.4 Facteurs de classification des relèves dans un RMHPG

2.2 Approches de contrôle d'admission dans les réseaux mobiles

Dans la littérature, plusieurs algorithmes de contrôle d'admission, se basant sur certains paramètres pour accepter ou rejeter les appels, ont été conçus pour la gestion des ressources de bande passante sans fil dans les réseaux mobiles. Parmi ces paramètres nous citons :

- *La disponibilité des ressources dans la cellule courante et les cellules voisines* : Les nouveaux appels sont admis seulement si les ressources demandées sont disponibles dans la cellule courante ainsi que dans les cellules voisines (Oliviera *et al.*, 1998). Pour cela, des

informations doivent être échangées entre les cellules.

- *Estimation de la probabilité d'échec de la relève* : La probabilité d'échec de la relève est estimée au fur et à mesure de l'occurrence des relèves et cette probabilité est utilisée comme critère d'admission (Levine *et al.*, 1995). Cette approche se base sur plusieurs hypothèses et approximations.

- *Contrainte stricte sur la probabilité d'échec de la relève* : Une politique d'admission est déterminée en optimisant une certaine fonction objective sujet à une contrainte sur la probabilité d'échec de la relève. Cette approche implique souvent une résolution se basant sur les processus de décision Markoviens (MDP) dont le temps de convergence vers l'état d'équilibre peut être assez élevé.

En passant en revue ces différents paramètres sur lesquels peut se baser un algorithme CAC, nous avons remarqué que les approches de conception d'algorithmes CAC peuvent être regroupées en deux grandes classes : celles qui impliquent les cellules voisines dans des réservations par appel en se basant sur *le schéma de la grappe d'ombrage* ; et celles qui effectuent des réservations par classe d'appels sur la cellule courante seulement en se basant sur *le schéma de la capacité de garde*. Dans ce qui suit, nous détaillerons les principes de chacun des deux schémas et nous discuterons de leurs limitations.

2.2.1 Contrôle d'admission basé sur la grappe d'ombrage

Aperçu sur le concept de grappe d'ombrage

Un réseau mobile doit permettre aux usagers de se déplacer d'une cellule à une autre sans dégrader ou couper un appel en cours. Vu la capacité sans fil limitée, il est très fréquent d'avoir des cellules surchargées à cause d'un trafic élevé d'appels. Dans ce cas, des appels peuvent être interrompus brusquement lors de leurs relèves d'une cellule à une autre. Pour éviter qu'un appel ne soit rejeté au milieu d'une session, il est possible d'effectuer des réser-

vations explicites et intelligentes dans les cellules voisines à la cellule courante et qui sont potentiellement candidates à la relève. Généralement, en plus des requis de QoS, d'autres paramètres tels que le mouvement futur et la vitesse de l'unité mobile sont très utiles pour effectuer des réservations efficaces. Ces paramètres peuvent être estimés en observant le passé et en gardant un historique de mobilité et d'appels qui va servir à construire un profil pour chaque usager. Le schéma de réservation ainsi décrit se base sur le concept de grappe d'ombrage ou *shadow cluster* initialement introduit par Levine *et al.* (1995). Selon ce concept, chaque station mobile qui maintient un appel en cours exerce une influence sur les cellules voisines à la cellule courante. De plus, elle exerce une influence sur les cellules situées le long de son trajet de déplacement qui peut être prédéterminé en utilisant un certain algorithme de prédiction. L'intensité de la grappe d'ombrage, représentant le niveau de réservation, s'atténue graduellement en s'éloignant de la cellule courante. Cette intensité dépend en général de la distance entre les cellules de la grappe et le point d'accès courant, de la durée de l'appel en cours, de la bande passante utilisée, de la trajectoire actuelle de la station mobile, et de sa vitesse. Un exemple de grappe d'ombrage est présenté à la Figure 2.5.

Remarquons que cette approche nécessite que chaque point d'accès échange les requis de bande passante de chaque usager qu'il dessert avec les autres points d'accès qui se trouvent sous sa grappe d'ombrage, afin d'effectuer les réservations hâtives. De plus, lors de l'admission d'un nouvel appel, une grappe d'ombrage temporaire peut être formée et va être réajustée par la suite à des intervalles de temps réguliers. Le contrôle d'admission utilisant ce schéma opère en acceptant ou en rejetant les appels, dépendamment des requis de bande passante donnés par la grappe courante. Ces requis doivent être satisfaits par la capacité disponible dans chacune des cellules formant cette grappe. Pour avoir plus de détails sur le contrôle d'admission utilisant la grappe d'ombrage et sur le calcul de la quantité de bande passante à réserver, le lecteur pourra se référer à Levine *et al.* (1995).

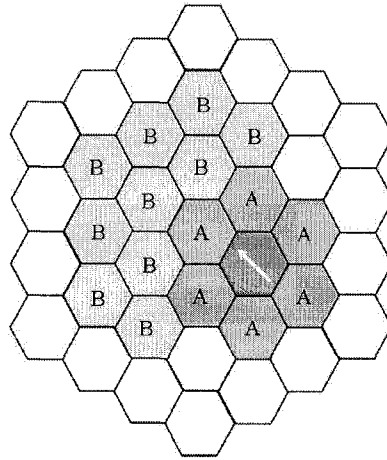


FIGURE 2.5 Grappe d’ombrage pour la relève d’une station mobile

Notons que le concept général de la grappe d’ombrage n’est pas spécifique à une technologie ni à une architecture particulière d’un réseau mobile particulier. L’adoption récente du tout-IP dans les réseaux mobiles, en prolongeant le réseau de transport commun utilisant le protocole standard IP Mobile vers le réseau d’accès sans fil, permet de considérer l’implantation de ce concept sur un RMHPG intégrant différents types d’accès. Pour cela le protocole de réservation de ressources RSVP utilisé dans les réseaux IP n’est plus adapté et a été remplacé par sa version mobile MRSVP (Talukdar *et al.*, 2001). Pour assurer la QoS, ce protocole agit au niveau réseau en effectuant des réservations hâtives qualifiées de “passives” sur un ensemble de routeurs d’accès potentiels pouvant être utilisés ultérieurement, et ceci à la manière d’une grappe d’ombrage sur les groupes de cellules desservant l’ensemble des routeurs d’accès potentiels.

Limitations du CAC basé sur la grappe d’ombrage

Bien que le concept de la grappe d’ombrage permette de réduire, du moins en théorie, la probabilité d’échec de la relève, il se base sur la disponibilité instantanée d’un certain

nombre d'informations sur la mobilité et sur la durée des appels qui peuvent être très difficiles à obtenir dans la pratique. Et même s'il est possible de fournir des informations sur les positions et les vitesses des unités mobiles en utilisant un système de localisation cellulaire ou un système de positionnement global (GPS), le traitement en temps réel de ces informations pour prédire leurs tendances futures est une tâche complexe très difficile à effectuer sur un point d'accès ou une station de base. De plus, il est très difficile de prédire exactement la durée d'un nouvel appel dont dépend fortement la grappe d'ombrage.

D'autres variantes de ce schéma ont été proposées, avec la seule différence dans l'estimation de la transition d'une cellule à une autre qui est supposée être prévisible à partir de quelques statistiques récoltées à long terme (Reininger et Izmailov, 1999) et non à partir d'informations de mobilité comme dans une grappe d'ombrage traditionnelle. Dans Reininger et Izmailov (1999), le schéma de CAC utilise un critère d'admission qui se base sur le calcul de la probabilité de relève comme une somme pondérée des probabilités de relève vers toutes les autres cellules. Toutefois, la prédiction de ces informations, en utilisant un historique de statistiques sur le comportement individuel des stations mobiles, est également une tâche complexe impossible à implanter efficacement. En effet, cette approche doit non seulement remédier au problème de l'évolutivité du schéma sur un nombre important et diversifié de stations mobiles mais aussi contourner la difficulté de prédiction due à la nature non toujours régulière du comportement et du déplacement individuel de chaque usager. Si l'échec de la prédiction ne viole pas la garantie du succès d'une relève grâce aux réservations à priori sur la grappe d'ombrage, il a, par contre, l'inconvénient de provoquer une sous-utilisation excessive des ressources de bande passante sans fil engendrant ainsi un taux de blocage très élevé.

D'un autre côté, l'utilisation du protocole MRSVP (Talukdar *et al.*, 2001) pour assurer la QoS lors de la relève engendre ce même type de problèmes tant au niveau de la couche réseau qu'au niveau de la couche liaison d'accès sans fil. En effet, malgré le fait que les

réservations d'une station mobile donnée, qui sont initialement passives, permettent de profiter à un trafic moins prioritaire juste pendant la période avant laquelle elles deviennent actives, ces dernières bloquent une quantité importante de nouveau trafic critique sur les cellules de la grappe d'ombrage. Pour réduire le gaspillage de la bande passante sans fil par MRSVP, outre l'utilisation de la version hiérarchique HMRSVP ou encore la version optimisée HPMRSVP (Abondo et Pierre, 2005), une technique beaucoup plus performante, se basant sur MRSVP, a été proposée par Rango *et al.* (2005). Cette technique utilise un algorithme de prédiction basé sur une fonction d'utilité qui tient compte de la variabilité de la qualité du lien radio suivant un modèle Markovien du canal sans fil. Toutefois, bien que cette technique (Rango *et al.*, 2005) permette d'améliorer l'utilisation de la bande passante sans fil, cette dernière introduit de nombreuses erreurs de prédiction accentuées par les déplacements imprévisibles et les vitesses élevées des usagers.

En général, les techniques se basant sur le concept de la grappe d'ombrage souffrent non seulement d'un taux de blocage élevé dû à des sur-réservations et à un trafic de messages de signalisation excessif mais aussi d'une évolutivité très restreinte à un nombre réaliste d'usagers, vu la complexité du traitement pour chaque usager et le maintien d'un état de contexte pour chaque réservation individuelle. Pour contourner toutes ces limitations, nous présenterons dans ce qui suit, un autre type d'approches plus efficaces, beaucoup plus évolutives et beaucoup plus utilisées dans les réseaux cellulaires.

2.2.2 Contrôle d'admission sur la capacité de garde

Aperçu sur le concept de la politique de capacité de garde

Hong et Rappaport (1986) ont été les premiers à introduire le concept de la politique de capacité de garde, appelée aussi politique de bande de garde, pour le contrôle d'admission dans les réseaux mobiles de deuxième génération. Cette politique d'admission permet de

réserver un certain nombre d'unités de bande passante sans fil $C - T$, avec C qui est la capacité totale de la cellule réservée exclusivement aux appels en relève alors que le reste de la capacité, noté T , peut être partagé entre les nouveaux appels et les appels en relève. Ainsi, on donne une priorité plus élevée aux appels en relève par rapport aux nouveaux appels dans le but de diminuer l'échec de la relève. Toutefois, la réduction de la probabilité d'échec de la relève, notée P_f , augmente le taux de blocage des nouveaux appels, noté P_b . De ce fait, la capacité de garde doit être choisie soigneusement suivant un compromis entre P_f et P_b . Toutefois, même si cette capacité de garde a été fixée de manière à contrôler P_f et P_b en se basant sur des hypothèses relatives aux paramètres de charge du trafic, cela ne garantit pas que ces deux probabilités P_f et P_b seront satisfaites, puisque les paramètres de charge varient continuellement de manière indéterministe.

Dans la littérature, il existe certains travaux tels que Wu *et al.* (2004) qui se sont intéressés à utiliser la politique de capacité de garde en tenant compte de l'aspect multi-services caractérisant les RMHPG. La réservation dans ce cas se base sur un partage complet des ressources entre les différentes classes de service. Sachant que chaque classe de service est définie par l'ensemble des appels ou connexions ayant le même profil de QoS, ce dernier est ajouté au critère d'admission du CAC dont la décision est redéfinie suivant une certaine politique de priorité d'admission. Des méthodes analytiques, exactes et approximatives, ont été utilisées pour étudier ces politiques de capacité de garde pour les différentes classes de service dans Wu *et al.* (2004).

CAC basé sur une capacité de garde dynamique

Des politiques de capacité de garde dynamique qui adaptent cette capacité de garde en fonction des paramètres du trafic ont été proposées dans Bartolini et Chlamtac (2001) et il a été montré qu'ils fournissent de meilleures performances que les politiques de capacité de garde statique étant donné le changement continu du trafic d'appels et de mobilité.

Il a été montré dans les travaux de Hong et Rappaport (1986) que la politique de capacité de garde peut minimiser une fonction objective linéaire en P_f et P_b . Il a été prouvé qu'une version améliorée de cette politique, appelée capacité de garde fractionnelle CGF pourrait être optimale si l'objectif est de minimiser P_b avec des contraintes très strictes sur P_f ou si l'objectif est de minimiser la capacité de garde avec des contraintes très strictes sur P_f et P_b . Dans cette politique de CGF, un nouvel appel est admis avec une probabilité β_i qui est une fonction non croissante de l'état de charge i d'une cellule en terme de nombre d'appels en cours de service. Par contre, un appel en relève est toujours accepté par cette politique d'admission de CGF tant qu'il y a un canal de libre, c'est-à-dire jusqu'à l'épuisement total de la capacité de la cellule. Notons que la politique de la capacité de garde standard est un cas particulier de la politique de CGF dans laquelle la fonction $\beta_i = 1$ pour $0 \leq i \leq T$ et $\beta_i = 0$ pour $T < i \leq C$.

Il a été montré qu'un autre cas particulier de la politique générale CGF, appelé aussi politique de CGF limitée (CGFL), se trouve être beaucoup plus efficace que le schéma de capacité de garde standard dans la minimisation du taux de blocage P_b et du nombre de canaux requis $C - T$ tout en maintenant la contrainte sur un P_f ne dépassant pas un certain seuil. Dans la politique de CGFL, tous les appels, nouveaux ou en relève, sont admis jusqu'à un certain seuil T pour lequel on accepte les appels avec une probabilité donnée β . Par contre, au-delà de ce seuil T , on n'accepte que les appels en relève. Fang (2003) a étendu le schéma général CGF pour le cas d'une multitude de types de trafic en donnant des priorités à des classes de service par rapport à d'autres. Dans El-kadi *et al.* (2002), les appels sont admis en fonction de leur priorité et des ressources disponibles. Pour cela, la politique de capacité de garde est utilisée pour les appels en relève. Si la capacité de garde ne suffit pas, alors des politiques de préemption et de privation sont utilisées. La préemption opère en rejetant les appels non-temps-réel pour libérer la capacité de garde dans le cas où il n'y a pas assez de capacité pour accepter les appels temps-réel. S'il n'y a

aucun appel non-temps-réel dans la capacité de garde, la préemption ne peut pas se faire, et la privation prend sa place en réduisant les ressources allouées aux appels de la classe de trafic à taux variable. Cette réduction de ressources allouées aux appels en cours doit se faire d'une manière équitable et graduelle pour accommoder le nouvel appel à admettre par le CAC.

Limitations du CAC basé sur la capacité de garde

Le CAC utilisant la politique de capacité de garde a le grand potentiel de pouvoir être optimal, du moins en théorie, pour la maximisation de l'utilisation de la bande passante sans fil. Cette optimalité est relative à la minimisation du taux de blocage P_b d'un seul service et la garantie d'un taux d'échec de relève P_f acceptable satisfaisant. Toutefois, le problème fondamental avec ce type de politique est la difficulté de trouver un moyen pratique pour estimer la capacité de garde optimale. En effet, dans la politique générale de CGF, il est difficile d'implanter une fonction β_i permettant d'allouer efficacement la bande passante sans fil aux différents types d'appels sans dégrader le taux d'échec de la relève. Cette fonction doit faire intervenir non seulement la charge de la cellule courante mais aussi d'autres paramètres tels que l'occupation instantanée des cellules voisines et le trafic potentiel de relève.

Pour résoudre ce problème, la capacité de garde dans Han et Nilsson (2000) est calculée comme étant la somme des différentes bandes passantes fractionnelles dans les cellules voisines pondérées par des paramètres qui reflètent les fractions du trafic potentiel de relève des cellules voisines vers la cellule courante. La bande passante fractionnelle est définie comme étant la bande passante occupée divisée par le nombre de cellules voisines. Cette somme est pondérée par $1 + i/C$ où i correspond aux unités de bande passante occupées et C à la capacité totale dans la cellule courante. Cette pondération est utilisée pour augmenter la capacité de garde quand le système devient de plus en plus chargé afin de diminuer le

taux d'échec de la relève P_f qui se trouve naturellement augmenté avec la charge du trafic.

Toutefois, ce schéma pose un autre problème qui se reflète dans la difficulté de déterminer la fraction de trafic en potentielle relève dont dépend fortement la fonction β_i . Il existe plusieurs techniques pour détecter si une station mobile est à la périphérie d'une cellule et si elle est sur le point de faire une relève. Pour réaliser cela, il est possible d'effectuer des observations sur la puissance du signal reçue par la station mobile. Par contre, si la politique de sélection du meilleur point d'accès pour la relève dépend d'autres paramètres inconnus et pas seulement de la puissance du signal, il serait très difficile d'estimer le trafic en potentielle relève, surtout sur une couverture cellulaire hiérarchique et hétérogène caractérisant les RMHPG.

CAC optimal avec contrainte sur l'échec de la relève

La probabilité d'échec de la relève P_f peut être contrôlée en considérant le processus d'admission comme un problème d'optimisation avec l'objectif de maximiser l'utilisation de la bande passante sans fil, de maximiser une fonction revenue, ou encore de minimiser la probabilité de blocage P_b sujet à une contrainte sur un P_f ne dépassant pas un certain seuil maximal P_f^{max} . Une politique d'admission optimale est généralement modélisée comme un processus de décision Markovien (MDP) qui formule un problème combinatoire sur l'ensemble des états et des décisions à prendre. Ainsi, la programmation linéaire peut être utilisée, tel que dans Kwon *et al.* (2000); Nasser et Hassanein (2005), pour trouver la meilleure politique d'admission à chaque état représentant le nombre d'utilisateurs par cellule. Puisque initialement ce problème n'est pas linéaire, d'autres techniques de programmation par séparation sont utilisées pour le rendre linéaire et le résoudre plus ou moins efficacement (Kwon *et al.*, 2000; Nasser et Hassanein, 2005).

Il a été montré dans Kwon *et al.* (2000) que la politique de CAC optimal qui maximise une fonction revenue tout en maintenant une contrainte sur P_f est celle de la politique de

CGF. Kwon *et al.* (2000) ont montré qu'un CAC optimal implante le schéma général de CGF si l'objectif est de minimiser le taux de blocage P_b ou encore la capacité de garde. Toutefois, dans les réseaux mobiles ayant un nombre élevé d'utilisateurs, la taille du problème combinatoire est assez élevée ce qui rend les résolutions basées sur les processus de décision Markovien (MDP) inefficaces et mêmes inutilisables dans certains cas. Pour contrer cela, des algorithmes génétiques ont été proposés comme une alternative pour trouver des politiques de CAC sous-optimales avec un temps de calcul plus ou moins élevé. En effet, un algorithme génétique a été utilisé dans les travaux de Xiao *et al.* (2000) pour trouver un CAC proche de l'optimal en minimisant une combinaison linéaire de P_b et de P_f avec une très grande pondération donnée à P_f dans la fonction de "fitness". Il a été montré que la performance de ce dernier est assez proche de celle de l'algorithme CAC optimal utilisant MDP.

D'un autre côté, il se trouve que les MDP utilisent généralement la distribution exponentielle pour modéliser le temps de résidence d'un appel dans une cellule. Toutefois, ceci n'est plus valide dans les réseaux mobiles d'aujourd'hui (Zeng et Chlamtac, 2003).

2.3 Contrôle d'admission et relèves verticales dans un RMHPG

2.3.1 Le contrôle d'admission dans les WLAN

Les réseaux locaux sans fil (WLAN) constituent une solution économique pour déployer des réseaux sans fil offrant des connexions sans fil à haute vitesse dans des zones très denses (immeubles, aéroports, cafés, etc.). Par contre, cette solution est loin d'être une alternative aux réseaux mobiles standard puisque les mécanismes du WLAN ne sont pas assez évolués pour supporter des relèves horizontales rapides entre points d'accès tout en assurant une QoS comparable à celle d'un réseau cellulaire. Ces dernières années, un nombre important de travaux, notamment au sein du groupe de travail IEEE802.11e (IEEE 802.11e-

Working-Group, 2005), ont permis d'améliorer la QoS dans les WLAN et de supporter ainsi les appels multimédia. En effet, l'introduction des priorités d'accès aux différentes classes de service dans le nouveau standard 802.11e ainsi que la fonction de coordination hybride (HCF), gérant les accès centralisés et contrôlés par la fonction de coordination centralisée (PCF) en plus des accès par contention, a permis d'implanter des mécanismes de contrôle d'admission pour les WLAN (Gao *et al.*, 2005) comparables à ceux des réseaux cellulaires. De plus, plusieurs recherches récentes ont permis de considérer les WLAN comme une technologie complémentaire aux réseaux mobile de prochaine génération leur donnant ainsi un grand potentiel d'intégration avec les technologies des réseaux mobiles 2.5, 3G et 4G telles que GPRS, EDGE, UMTS, HSDPA, LTE, etc. On a pu ainsi construire des réseaux mobiles hétérogènes et économiques, qu'on appelle aussi réseaux mobiles hétérogènes de prochaine génération (RMHPG).

2.3.2 Le contrôle d'admission dans un RMHPG

L'intégration des accès hétérogènes permet non seulement d'économiser des coûts en déployant dans chaque région de la couverture le type d'accès qui lui est adéquat, mais aussi d'augmenter la capacité du RMHPG en nombre d'utilisateurs supportés, en balançant la charge sur plusieurs types d'accès. De plus, cette intégration a introduit un nouveau type de relèvement qu'on appelle *relèvement verticale* ou *relèvement inter-système* et qui permet à une unité mobile *multi-mode* ayant plusieurs types d'interfaces radio, de changer de technologie d'accès pour diverses raisons dont les plus importantes sont : assurer la continuité du service ; diminuer le taux de blocage en balançant la charge sur plusieurs types d'accès ; diminuer le coût d'utilisation ; augmenter la vitesse de transmission. Ce sont toutes ces raisons qui expliquent la forte demande pour des mécanismes d'inter-fonctionnement et d'interopérabilité entre différents types de réseaux mobiles dans les RMHPG. Par conséquent, des

mécanismes d'inter-fonctionnement des CAC existants pour chaque type de réseau mobile ainsi que de nouveaux CAC beaucoup plus efficaces pour la gestion de ressources hétérogènes doivent être conçus pour assurer la QoS à coût abordable dans les RMHPG.

À cet effet, Cheng et Lin (2005) ont proposé un mécanisme de coordination des CAC existants en utilisant une architecture d'intégration et d'interopérabilité des réseaux basée sur le protocole IPv6. Ce mécanisme permet de coordonner l'ajustement dynamique de la capacité de garde dans chaque réseau mobile intégrant le RMHPG. D'un autre côté, Song *et al.* (2005) ont proposé un nouveau mécanisme de contrôle d'admission assez efficace assurant une intégration WLAN/cellulaire à couplage faible en se basant sur une approche de différenciation de services. Cette approche différencie entre service de voix et service de données, puis affecte l'accès cellulaire au trafic de voix et l'accès WLAN au trafic de données. Lors d'une éventuelle surcharge ou indisponibilité de l'accès WLAN, le mécanisme sélectionne l'accès cellulaire pour le trafic de données. Song *et al.* (2005) ont prouvé que cette stratégie de sélection du réseau permet d'améliorer significativement les performances d'un service de voix de haute priorité tout en profitant de la capacité élevée et du service "best effort" du WLAN qui est beaucoup plus adéquat pour un trafic de données. Cela permet ainsi de contourner les difficultés rencontrées dans l'implantation des mécanismes de garantie et de maintien de QoS pour le trafic de voix dans les WLAN. En effet, ces difficultés sont beaucoup plus accentuées lors de la mobilité, du fait que les WLAN utilisent des mécanismes de gestion de mobilité et de localisation qui sont relativement primitifs et très peu efficaces par rapport à ceux utilisés dans les réseaux cellulaires. De ce fait, les relèves verticales du WLAN aux réseaux cellulaires doivent être supportées afin de garantir, lors de la mobilité, la QoS au niveau appel des services de voix initiés dans un WLAN. Notons qu'il existe deux classes de priorité pour les relèves verticales : les relèves verticales obligatoires et les relèves verticales volontaires.

2.3.3 Priorités des relèves dans un RMHPG

Relève verticale obligatoire

Généralement, la relève verticale est qualifiée de critique lorsqu'elle permet d'assurer une continuité de service surtout là où le type d'accès utilisé n'est plus offert sur la couverture. Dans ce cas, la station mobile est obligée de changer de technologie d'accès et cela, de manière transparente à l'utilisateur. La relève verticale, dite "vers le haut" (*upward vertical handoff*) dans ce cas, est inévitable et a le même niveau d'importance qu'une relève horizontale "dure" (*hard handoff*). Généralement le CAC qui s'occupe d'admettre ce type de relève est celui de l'accès UMTS ou GPRS mais jamais celui de WLAN puisque ce dernier constitue le niveau le plus haut de la hiérarchie d'un RMHPG typique, ayant la plus petite couverture. Sous ce schéma de relève verticale "vers le haut", le défi se situe au niveau du choix de l'instant le plus approprié pour initier la relève. En effet, la procédure de relève doit s'effectuer ou bien avant la perte de la connexion en cours engendrée par la sortie de l'utilisateur de la couverture du réseau mobile courant, ou bien avant la dégradation de la QoS engendrée par sa surcharge éventuelle.

Si des procédures avancées de mesures continues de l'affaiblissement de la puissance du signal et de la montée de la charge du réseau mobile courant peuvent être utilisées pour choisir le bon moment de la relève, la relève verticale elle-même peut poser d'autres problèmes de dégradation temporaire de la QoS. Rappelons qu'il existe plusieurs types de couplage pour effectuer l'intégration des accès hétérogènes et que le couplage le plus adéquat pour une gestion efficace des ressources hétérogènes est le couplage très fort, appelé aussi intégration complète, qui s'effectue au niveau du contrôleur radio. Toutefois, ce sont les autres types de couplage au niveau du routeur de frontière (GGSN dans une architecture UMTS (3GPP, 1999)) ou MAP dans une architecture HMIPv6 (SOLIMAN *et al.*, 2005)) ou au niveau du premier routeur (SGSN dans une architecture UMTS ou routeur d'accès

AR dans une architecture HMIPv6) qui sont les plus étudiés dans la littérature, à cause de leur flexibilité et de la simplicité de l'interopérabilité utilisant le protocole de transport IP. Malheureusement, ce type de couplage accentue encore plus les problèmes de détérioration de la QoS (délais et pertes de paquets) lors de la relève inter routeurs d'accès qui a une latence assez élevée surtout pour un couplage faible comme le montre la Figure 2.6a. En effet, les types de couplage couramment utilisés font que, pour chaque relève verticale, un nombre assez élevé de messages de signalisation doivent circuler à partir de la station mobile sur un long chemin, qui est beaucoup plus long pour un couplage faible comme illustré à la Figure 2.6a que pour un couplage fort comme montré à la Figure 2.6b, jusqu'au routeur d'interconnexion des deux réseaux mobiles hétérogènes. Ces messages de signalisation permettent d'acquérir une nouvelle adresse IP régionale, de mettre à jour la localisation (par des messages de *Bindings Updates* définis par SOLIMAN *et al.* (2005)) et de s'associer/s'authentifier éventuellement au nouveau type d'accès mobile.

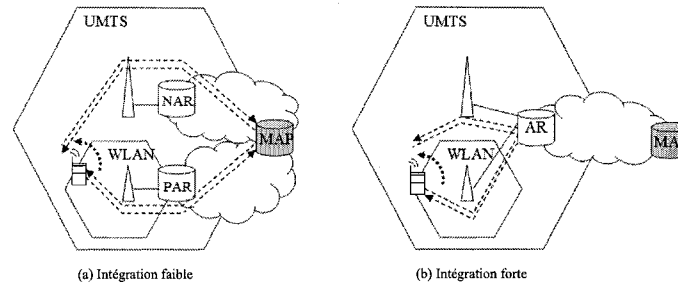


FIGURE 2.6 Relève verticale HMIPv6

Dans le cas d'un couplage très fort ou d'une intégration complète au niveau du contrôleur radio, la relève verticale obligatoire peut ne plus faire intervenir la signalisation au niveau HMIPv6 en gardant la même adresse IP. En effet, ce type de couplage peut être considéré comme un pontage local au niveau de la couche liaison de données entre deux type d'accès sans fil. Dans ce cas, la relève verticale obligatoire peut se faire très rapide-

ment avec un minimum d'interruption de service possible.

Relève verticale volontaire

Contrairement à une relève verticale “vers le haut”, une relève verticale “vers le bas” (*downward vertical handover*), est souvent moins critique puisqu'elle n'est pas contrainte par la continuité du service. Elle permet juste de profiter de certaines préférences de l'utilisateur et/ou de l'opérateur, d'un meilleur ratio qualité/prix du service ou encore de balancer la charge sur différents réseaux mobiles. Pour cela, l'admission des appels en relève verticale volontaire, d'un réseau UMTS ou GPRS vers un réseau WLAN par exemple, dispose de la possibilité de tolérer un échec de relève sans aucun impact sur la continuité de l'appel servi sur la cellule UMTS ou GPRS courante.

CHAPITRE 3

CADRE GÉNÉRIQUE POUR LA MODÉLISATION ET L'ANALYSE DES PERFORMANCES D'UN RMHPG

Dans un RMHPG, la diversification des réseaux mobiles par leurs technologies d'accès, leurs capacités de transmission, la taille de leurs cellules et l'étendue de leurs couvertures incitent à concevoir de nouveaux modèles adaptés non seulement à cette diversification mais aussi aux caractéristiques de l'intégration de ces réseaux mobiles hétérogènes. En particulier, il devient inadéquat d'utiliser les modèles de mobilité existants pour tous les types de cellules, compte tenu de leur différentes tailles et des différents profils de mobilité qui les caractérisent. De plus, les modèles d'allocation de ressources de bande passante sans fil doivent être adaptés aux nouveaux mécanismes implantés pour l'intégration des réseaux dans un RMHPG qui sont essentiellement les stratégies de sélection du réseau d'accès et les relèves verticales inter-systèmes. Ces mécanismes pourraient avoir un impact important sur les performances d'un RMHPG et, par conséquent, sur sa conception, sa planification et son intégration.

Le présent chapitre propose un nouveau cadre analytique générique et précis pour la modélisation de la mobilité dans un RMHPG et d'analyser les performances de ce type de réseaux lors de l'utilisation des mécanismes d'allocation de bande passante sans fil par contrôle d'admission. Ce cadre analytique se veut assez générique pour permettre une modélisation unifiée de n'importe quelle combinaison de réseaux mobiles hétérogènes intégrés dans un RMHPG et assez précis pour capturer les caractéristiques particulières de chacun de ces réseaux mobiles hétérogènes. Nous nous intéresserons à fournir tous les requis de modélisation assurant précision et maniabilité analytique pour la formulation et l'estima-

tion des métriques de performance d'un RMHPG. En particulier, nous montrerons que le choix du modèle de mobilité dans certains RMHPG a un impact important sur les performances de ces derniers.

3.1 Hypothèses et cadre de travail

Dans le but de faciliter notre travail de modélisation et d'analyse des performances d'un RMHPG, nous fixons un certain nombre d'hypothèses par rapport aux classes de service et à la définition de la QoS.

3.1.1 Les classes de service

Une des motivations importantes d'intégrer plusieurs réseaux mobiles hétérogènes dans un RMHPG est de pouvoir fournir aux usagers une combinaison d'une variété de services de communications qu'un réseau mobile homogène seul ne peut fournir, tout en assurant ubiquité et coût abordable. Généralement, les différents services de communications sont classés selon leur tolérance au délai, du fait de leur utilisation d'un même médium sans fil très vulnérable aux interférences radio. Ce critère de classification a été bien utilisé par le projet de partenariat de troisième génération (3GPP) pour définir les quatre classes de service du standard UMTS détaillées dans le chapitre précédent. D'autres types de réseaux mobiles peuvent utiliser une autre classification des différents services. Par conséquent, nous devons tenir compte du mécanisme de "mapping" de QoS (Ben Ali *et al.*, 2005) présenté dans le chapitre précédent. Rappelons que ce mécanisme permet d'assurer la cohérence des classes de service des différents réseaux mobiles hétérogènes avec celle d'un réseau IP DiffServ d'interconnexion dans le cas d'un couplage faible. Dans le but de considérer l'aspect multi-services d'un RMHPG dans la modélisation du partage de la bande passante sans fil par plusieurs appels appartenant à différentes classes de service, nous sup-

posons que cette bande passante sans fil est partagée en utilisant le mécanisme d'accès restreint initialement introduit dans les réseaux filaires par Naghshineh et Acampora (1996). En effet, cette supposition nous épargnera le développement des modèles multi-classes qui se caractérisent par une très grande complexité analytique et qui ont été déjà étudiés dans la littérature (Malomsoky *et al.*, 2003; Nasser et Hassanein, 2005). Ainsi, nous supposons que nous connaissons à chaque instant la capacité approximative d'une cellule donnée en nombre maximal d'appels d'une classe de service donnée pouvant être accommodés sans violer leur contraintes de QoS au niveau paquet. Quelques modèles analytiques donnant la capacité de certains types de cellules sont brièvement présentés plus loin dans ce chapitre.

3.1.2 La QoS au niveau paquet

Rappelons que dans nos modèles nous nous intéresserons beaucoup plus aux métriques de QoS au niveau appel, et plus spécifiquement à l'influence des modèles de mobilité sur ces métriques de performance telles que la probabilité de blocage des nouveaux appels et la probabilité de coupure des appels en relèvement, définies dans le chapitre 2. Par ailleurs, nous supposons que la QoS au niveau paquet est assurée stochastiquement en allouant une bande passante effective (Kelly, 1996) suffisante pour garantir un seuil maximal de probabilité de perte de paquets et/ou une probabilité de violation d'un seuil maximal de délai ou de gigue. Les valeurs de ces contraintes sont fixées en fonction de la tolérance de chaque classe de service aux différentes métriques de QoS au niveau paquet (perte de paquets, délai et gigue).

3.1.3 Modélisation de la mobilité

En général, la mobilité peut être modélisée en utilisant des modèles analytiques ou des modèles de simulation. Les simulations sont capables de fournir des modèles de mobilité

réalistes puisqu'elles utilisent une très grande quantité de détails dans la construction de la trajectoire de la station mobile en traçant périodiquement sa localisation géographique sur des petits intervalles de temps. Toutefois, ces modèles sont généralement très complexes à manipuler quand on considère des topologies à grandes couvertures avec un nombre important d'utilisateurs. Par conséquent, les modèles analytiques basés sur une modélisation du temps de résidence cellulaire utilisant les variables aléatoires et les processus stochastiques sont beaucoup plus adaptés dans notre cas. Dans la section suivante, nous développons un nouveau modèle analytique de mobilité dans des couvertures radio hétérogènes.

3.2 Modèles de mobilité non uniforme dépendant de la localisation

La plupart des modèles de mobilité utilisés dans la littérature supposent une homogénéité spatiale du trafic de mobilité sur une même cellule d'un réseau mobile homogène. Cette répartition uniforme du trafic sur une même cellule ne doit pas être confondue avec la répartition spatiale du trafic sur plusieurs cellules de même type. En effet, les modèles existants peuvent généralement être ré-utilisés pour une répartition hétérogène du trafic sur plusieurs cellules, mais ils ne considèrent cependant pas la variabilité du trafic de mobilité dans une même cellule en fonction des régions de la cellule où d'autres types de couvertures peuvent co-exister. Il est primordial de considérer dans nos modèles cette non uniformité de la mobilité à l'intérieur d'une même cellule couverte par plusieurs autres types de cellules. En effet, cette considération pourrait avoir un impact important non seulement sur les performances globales du RMHPG mais aussi sur les performances de chaque réseau d'accès mobile séparément. Ceci est essentiellement causé par le trafic d'appels et de mobilité de nouvelle nature provenant de multiples réseaux d'accès implantant les mécanismes de sélection de réseau et les relèves verticales inter-systèmes. Dans le but d'avoir un modèle général extensible, nous considérons un nombre quelconque N de réseaux mobiles

hétérogènes sous forme de N couches en superposition, chacun planifié avec une certaine couverture radio. Par contre, comme il existe aujourd'hui un ensemble précis de technologies d'accès mobile qui sont bien établies en industrie, nous fournirons des modèles de mobilité adaptés à chacun de ces types de technologies les plus répandues sur le marché actuel soient : GPRS pour un réseau 2.5G, UMTS pour un réseau 3G et IEEE 802.11 pour un réseau WLAN. Généralement, une même macro-cellule 2.5G est recouverte de plusieurs micro-cellules 3G dont chacune est à son tour recouverte par plusieurs pico-cellules WLAN et cela, de manière hiérarchique. Ainsi, étant donné ces couvertures hétérogènes dans une même macro-cellule 2.5G, nous pouvons recenser trois types de mobilité : une mobilité dans une couverture de type WLAN recouvrant les autres couvertures 3G et 2.5G, une mobilité dans une couverture de type 3G recouvrant la couverture 2.5G et une mobilité dans une couverture simple de type 2.5G.

3.2.1 Modèle de mobilité dans les couvertures de type WLAN

Les réseaux locaux sans fil (WLAN) selon le standard IEEE 802.11 sont généralement déployés dans des environnements intérieurs (immeubles, aéroports, cafés, etc.) et par suite la mobilité des usagers dans ce type de couverture est relativement faible. Désignons par TRC_w la variable aléatoire représentant le temps de résidence cellulaire (TRC), c'est à dire la période de temps passée par une station mobile à l'intérieur d'une cellule WLAN. La faible mobilité dans les WLAN induit un TRC qui suit une distribution à queue lourde tel qu'il a été démontré dans une étude récente réalisée par Thajchayapong et Peha (2006). Cette étude sur le trafic de mobilité dans un large réseau WLAN d'un campus universitaire a permis de montrer que le TRC dans les WLAN dévie largement de la distribution exponentielle habituellement utilisée et suit plutôt une distribution à queue lourde, plus précisément une distribution de Pareto. L'effet Pareto dans le TRC s'illustre comme suit :

étant donné la petite taille d'une cellule WLAN, une grande proportion d'utilisateurs y restent durant une courte période de temps alors qu'une petite proportion d'utilisateurs y restent pour une très longue période de temps. La fonction de densité de probabilité (PDF) de TRC_w selon une distribution de Pareto avec une moyenne η_w et un paramètre de forme k est donnée par : $f_{TRC_w}(t) = k\eta_w^k((k-1)/k)t^{k-1}$. En utilisant les valeurs des paramètres de la distribution de Pareto déduits à partir des mesures faites par Thajchayapong et Peha (2006), c'est-à-dire à partir de l'expression $f_{TRC_w}(t) = 0.374t^{-1.44}$, nous déduisons que la moyenne et la variance de cette distribution selon ces valeurs de paramètres sont infinies. De plus, puisque la fonction génératrice du moment de la distribution de Pareto est indéfinie, il est souvent très difficile d'analyser les performances en utilisant cette distribution. Par conséquent, certaines approximations s'imposent pour faciliter la tâche d'analyse. Selon Song *et al.* (2007), il est possible de faire une approximation de cette distribution de Pareto par une distribution hyper-exponentielle. Ainsi, afin de mieux modéliser la mobilité dans les couvertures de type WLAN caractérisée par cet effet Pareto et par suite estimer avec plus de précision les performances du RMHPG, nous utilisons une distribution hyper-exponentielle à deux stages qui n'est autre que la somme de deux distributions exponentielles permettant de capturer la grande variabilité du TRC caractérisant les distributions à queue lourde. La fonction de densité de probabilité de TRC_w , ayant η_w comme paramètre de moyenne et α_w comme paramètre de variabilité, ainsi que sa transformée de Laplace est donnée par les équations suivantes :

$$f_{TRC_w}(t) = \frac{\alpha_w}{1 + \alpha_w} \alpha_w \eta_w e^{-\alpha_w \eta_w t} + \frac{1}{1 + \alpha_w} \frac{\eta_w}{\alpha_w} e^{-\frac{\eta_w}{\alpha_w} t} \quad (3.1)$$

$$F_{TRC_w}(s) = \frac{(\alpha_w^2 - \alpha_w + 1)s + \alpha_w \eta_w}{(\alpha_w s + \eta_w)(s + \alpha_w \eta_w)} \quad (3.2)$$

3.2.2 Modèle de mobilité dans les couvertures de type 3G

Contrairement aux réseaux WLAN qui sont des réseaux déployés dans des environnements locaux intérieurs caractérisés par une très faible mobilité ou une mobilité piétonne, les réseaux mobiles 3G selon le standard UMTS sont souvent déployés dans des environnements extérieurs urbains caractérisés par une mobilité plus élevée (piétonne et véhiculaire). Comme il a été indiqué dans le chapitre précédent, les réseaux UMTS sont généralement déployés en utilisant des cellules de petites tailles dans les régions urbaines denses afin de limiter les interférences inter cellulaires et par suite augmenter la capacité WCDMA. Étant donné la petite taille des cellules UMTS par rapport à celle des cellules dans les réseaux de générations antérieures, la mobilité n'est fort probablement pas la même. En effet, il a été montré par Fang et Chlamtac (1999) que lorsque le TRC a une faible variance, généralement induite par des cellules de petites tailles, la distribution exponentielle n'est plus valide pour modéliser ce TRC. Ainsi, pour capturer cette faible variance dans les couvertures de type 3G, d'autres distributions telles que Gamma, Erlang et Hyper-Erlang ont été proposées pour modéliser le TRC. Dans notre cas, nous utiliserons une simple distribution d'Erlang de moyenne η_u et de paramètre de forme ou de variabilité m pour modéliser le TRC dans une micro cellule 3G, notée TRC_u et dont la fonction de densité de probabilité est donnée par :

$$f_{TRC_u}(t) = \frac{(m\eta_u)^m t^{m-1}}{(m-1)!} e^{-m\eta_u t} \quad (3.3)$$

3.2.3 Modèle de mobilité dans les couvertures de type 2.5G

Pour le TRC dans des cellules 2.5G selon le standard GPRS, nous utiliserons la distribution exponentielle habituelle de paramètre moyen η_g et dont la fonction de densité de

probabilité est donnée par :

$$f_{TRC_g}(t) = \eta_g e^{-\eta_g t} \quad (3.4)$$

Ceci revient à fixer le paramètre de variabilité $m = 1$ dans la distribution d'Erlang du modèle précédent.

3.2.4 Modèle de mobilité généralisé dans un RMHPG

Il n'a pas été prouvé qu'une distribution hyper-exponentielle peut être universelle dans la capture précise des valeurs de n'importe quel TRC dans des cellules WLAN visitées selon des profils de mobilité variés. Il est de même pour une distribution d'Erlang dans la capture précise des valeurs de n'importe quel TRC dans des micro-cellules 3G. Dans notre modèle de mobilité généralisé qui sert à construire un modèle générique pour n'importe quel RMHPG, il est possible d'utiliser une distribution Gamma qui est universelle dans la capture de n'importe quel TRC dans n'importe quel type de cellule. Cette distribution définie par deux paramètres de moyenne et de variance, possède la caractéristique intéressante de nous permettre d'observer l'effet de la variance du TRC, c'est-à-dire l'effet du deuxième paramètre de la distribution sur les performances du RMHPG tout en gardant constant le taux de mobilité moyen fixé par le premier paramètre de la distribution. Toutefois, dans le but de fournir une bonne précision dans l'estimation des indices de performance d'un RMHPG typique intégrant WLAN, UMTS et GPRS à l'aide du développement de chaînes de Markov, il serait judicieux d'utiliser les distributions hyper-exponentielle, Erlang et exponentielle au lieu de la distribution Gamma afin de préserver la propriété Markovienne du système. Plus loin dans ce chapitre, nous comparons les performances données par ces différentes distributions du TRC.

3.3 Modèles de trafic et de capacité d'appels

Dans le but d'analyser les performances de n'importe quel RMHPG en termes de probabilités de blocage, nous présentons dans cette section les modèles de trafic d'appels et les modèles de capacité d'appels que nous utilisons dans notre cadre générique de modélisation.

3.3.1 Modèle de trafic d'appels

Supposons que nous avons un RMHPG quelconque se composant de plusieurs niveaux de cellules hétérogènes en recouvrement. Alors nous posons les hypothèses suivantes :

- Les nouveaux appels arrivent à chaque cellule de niveau k selon un processus de Poisson de taux moyen λ_k , ce qui est une hypothèse très couramment utilisée dans la littérature ;
- Le temps de maintien d'appel, noté TMA et représentant la durée de l'appel dans le RMHPG, dépend généralement du comportement et des habitudes d'appels de l'utilisateur en fonction par exemple de la période de la journée. Le TMA est modélisé par une distribution exponentielle de taux moyen $1/\mu$;
- Les appels effectuant une relève horizontale arrivent selon un processus de Poisson de taux moyen ν_k . Cette approximation du trafic de relève par un processus de Poisson a été vérifiée par Chlebus et Ludwin (1995). La validation des résultats analytiques par simulations à événements discrets dans le chapitre suivant nous montrera que cette hypothèse reste valide dans notre travail ;
- Les appels effectuent une relève verticale, qualifiée d'obligatoire, lorsqu'il y a un échec de la relève horizontale causé soit par un refus d'admission de l'appel en relève à la cellule voisine candidate à la relève soit par une rupture imminente de la couverture courante. L'arrivée des appels en relève verticale à une cellule au niveau k en provenance de plusieurs cellules au niveau $k + 1$ est supposée elle aussi suivre un processus de Poisson

mais de taux moyen v_{k+1}^{vert} ;

- Le temps de maintien du canal, noté TMC, représente le temps de service d'un appel par une cellule donnée. Fang et Lin (1998) ont montré que si on fait l'hypothèse, comme dans notre cas, d'une arrivée Poissonienne des nouveaux appels et d'un TMA exponentiel, alors le TMC des nouveaux appels et le TMC des appels en relève peuvent être modélisés par des distributions exponentielles si et seulement si le TRC est exponentiel. Selon la Figure 3.1, le TMC moyen pour les nouveaux appels et le TMC moyen pour les appels en relève sont définis respectivement comme suit :

$$\frac{1}{\mu_k^{new}} = \min\{t_c, r_1\} \quad (3.5)$$

$$\frac{1}{\mu_k^{ho}} = \min\{r_m, t_m\} \quad (3.6)$$

Étant donné les hypothèses d'un TMA exponentiel et d'une arrivée Poissonienne des nouveaux appels, alors le théorème 2 de Fang et Lin (1998) nous permet de développer les expressions ci-bas (équations 3.8) pour le TMC moyen des nouveaux appels et pour le TMC moyen des appels en relève, qui sont égales si et seulement si le TRC est exponentiel (Fang et Chlamtac, 1999). Toutefois, ce cas n'est considéré dans notre cadre de travail puisque nous considérons un modèle général utilisant la distribution Gamma pour modéliser le TRC dans n'importe quel type de réseau mobile hétérogène ou encore des distributions beaucoup plus précises que l'exponentielle pour modéliser le TRC dans certains réseaux mobiles particuliers tel que le WLAN.

$$\frac{1}{\mu_k^{new}} = -(F_{TMC}^{new,k})'(0) = \frac{1}{\mu} - \frac{\eta_k}{\mu^2} (1 - F_{TRC_k}(\mu)) \quad (3.7)$$

$$\frac{1}{\mu_k^{ho}} = -(F_{TMC}^{ho,k})'(0) = \frac{(1 - F_{TRC_k}(\mu))}{\mu} \quad (3.8)$$

F_{TRC_k} étant la transformée de Laplace de la fonction de densité de probabilité du TRC dans les cellules au niveau k du RMHPG.

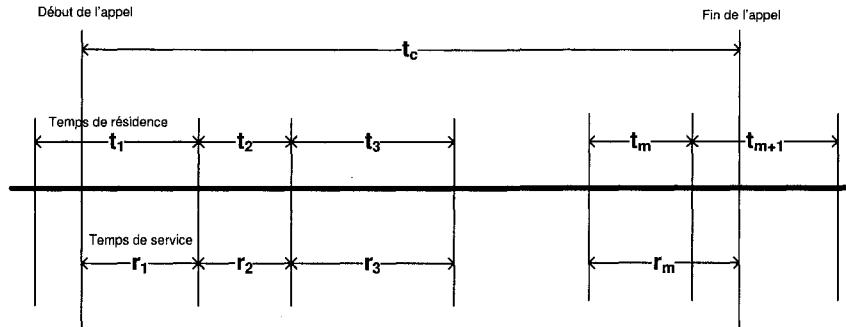


FIGURE 3.1 Diagramme temporel pour les TRC ($t_1, \dots, t_{m+1}$), TMC ($r_1, \dots, r_m$) et TMA t_c

Notons que puisqu'en réalité le trafic est dynamique et non homogène, c'est-à-dire que son intensité dépend du comportement d'appel et de mobilité de l'utilisateur ainsi que des paramètres géographiques, les taux moyens de trafic $\lambda_k(t)$, $\nu_k(t)$, $\nu_{k+1}^{vert}(t)$, $\mu(t)$ et $\eta_k(t)$ doivent être considérés variables en fonction du temps et de l'espace. Pour simplifier le développement analytique de nos modèles, nous nous intéresserons à des régions géographiques à haute densité de trafic et ayant une homogénéité spatiale.

D'un autre côté, notons qu'il existe une dépendance temporelle des différents paramètres de trafic due à la non stationnarité de l'intensité du trafic et à sa variation en fonction des différentes périodes de la journée, de la semaine, etc. Cependant, comme il est extrêmement difficile de développer des équations d'équilibre pour des modèles Markoviens non homogènes, c'est-à-dire dont les paramètres de trafic dépendent du temps, nous utilisons les valeurs moyennes de ces paramètres de trafic durant des intervalles de temps de durée prédéfinie. Dans le but d'avoir une hypothèse d'homogénéité valide pour notre système durant chacun de ces intervalles de temps, nous supposons qu'il est suffisamment long pour

atteindre l'état d'équilibre assez rapidement pour négliger l'état transitoire du changement de l'intensité de trafic au début de chaque intervalle de temps. Dans la suite de la thèse, nous allégerons les notations en éliminant la dépendance temporelle et en supposant que le développement de nos modèles est valide à l'intérieur de chaque intervalle de temps.

3.3.2 Modèle de capacité des cellules hétérogènes dans un RMHPG

Dans un RMHPG, la bande passante sans fil est accessible selon diverses techniques d'accès en fonction de la technologie utilisée. Pour un réseau de type 2.5G, suivant les standards GPRS ou EDGE, l'accès au canal radio se fait en utilisant la technique d'accès multiple par division de temps (TDMA). Pour un réseau de type 3G, suivant les standards UMTS, HSDPA ou CDMA2000, on utilise la technique d'accès multiple par division de code (CDMA/WCDMA). Pour un réseau de type WLAN, suivant les standards IEEE 802.11abg, on utilise la technique d'accès multiple par détection de porteuse et esquive de collisions (CSMA/CA) pouvant être améliorée par des mécanismes centralisés d'accès et d'allocation de slots de temps. Dans d'autres nouveaux types de réseaux mobiles tels que WiMax selon le standard IEEE 802.16e et Super3G/Pre4G selon les standards HSOPA ou LTE, on utilise la technique d'accès multiples par division de fréquences orthogonales (OFDMA) sur des systèmes à antennes multiples (MIMO). Étant donné ces différentes techniques d'accès au canal radio, les capacités des cellules hétérogènes d'un RMHPG doivent être modélisées de manières différentes en fonction de la technologie d'accès. En effet, chaque technologie a sa propre définition du canal de transmission unitaire comme étant un slot de temps, une séquence de codes, une bande de fréquences, etc.

Modèle de capacité d'une cellule 2.5G/GPRS

Un réseau d'accès 2.5G basé sur le standard GPRS ou EDGE utilise la même technique d'accès que celle du réseau 2G/GSM c'est-à-dire l'accès multiple par division de temps (TDMA) en ayant le slot temps comme canal de transmission unitaire. Contrairement à un appel de voix qui occupe un slot de temps, un appel de donnée GPRS peut occuper un nombre variable de slot de temps entre un minimum de 2 et un maximum de 8 slots de temps, en fonction de la saturation ou de la disponibilité de la station de base. Le débit binaire de chaque slot de temps est déterminé par le schéma de codage qui caractérise la qualité de la transmission radio (de CS1=9Kbps à CS4=21Kbps). Ainsi le débit théorique maximal est de 8 slot de temps x CS4 = 171.2 Kbps. Par contre pour les appels de voix un nombre constant de slot de temps est toujours alloué pour chaque cellule, donc le modèle de capacité pour les appels de voix est trivial.

Modèle de capacité d'une cellule 3G/UMTS

Nous supposons que le réseau d'accès 3G est basé sur le standard UMTS avec la technique d'accès WCDMA. Un appel de voix par exemple est supposé utiliser un chip code WCDMA sur un canal dédié (DCH) de l'UMTS. Rappelons que la bande passante WCDMA est partagée entre les appels appartenant à quatre classes de service : conversationnelle, streaming, interactive et background. Par conséquent, la région de la capacité d'une cellule 3G selon le standard UMTS est souvent analysée en utilisant des modèles de capacité multi-dimensionnels (Malomsoky *et al.*, 2003) qui sortent du cadre de notre travail. En supposant nc classes d'appel ou classes de service, la capacité logicielle "soft capacity" offerte par l'accès WCDMA est modélisée par Holma et Toskala (2004) par l'ex-

pression de charge suivante :

$$\eta_{DL} = \sum_{k=1}^{nc} \sum_{i_k=1}^{c_{i_k}} \frac{\rho + f_{DL}}{\frac{W_c}{(\frac{E_b}{N_0})_k \beta_k R_{b,k}} + \rho} \quad (3.9)$$

où c_{i_k} est le nombre d'appels de type k , ρ est le facteur d'orthogonalité, f_{DL} est le ratio entre l'interférence inter-cellulaire et la puissance intra-cellulaire mesurée au niveau du récepteur de la station mobile, W_c est la bande de fréquence totale de la cellule, $R_{b,k}$ est le taux binaire d'un appel de type k , β_k le facteur d'activité, et $(\frac{E_b}{N_0})_k$ est le requis de QoS pour le ratio énergie sur le bruit d'interférence. La limitation de la puissance de la station de base (noeud-B) est équivalente à la limitation de la charge exprimée comme suit :

$$\eta_{max} = 1 - \frac{P_p + P_N X_n}{P_{T,max}} \quad (3.10)$$

Où :

$$X_n = \sum_{k=1}^{nc} \sum_{i_k=1}^{c_{i_k}} \frac{L_{p,i_k}}{\frac{W_c}{(\frac{E_b}{N_0})_k \beta_k R_{b,k}} + \rho} \quad (3.11)$$

L_{p,i_k} est la perte de chemin pour le i_k^{ieme} usager, P_p est la puissance dédiée aux canaux de contrôle communs de l'UMTS, P_N est la puissance du bruit ambiant et $P_{T,max}$ est la puissance maximale de transmission de la station de base. En utilisant les équations 3.9-3.11, il est possible d'estimer la capacité d'une cellule 3G en terme de nombre maximal d'appels de voix par exemple, qui est une fonction du nombre actuel d'appels admis dans chacune des autres classes de service. Dans le but de simplifier notre analyse, nous supposons que nous donnons une priorité préemptive aux appels de voix par rapport aux autres types d'appels en implantant le mécanisme d'accès restreint (Naghshineh et Acampora, 1996) illustré à la Figure 3.2. Par conséquent, la région de la capacité peut être facilement évaluée sans

avoir connaissance du trafic des autres classes de service.

Modèle de capacité d'une cellule WLAN

Malgré le fait que le mécanisme de différenciation de QoS introduit dans la fonction de coordination distribuée (DCF) du tout récent standard IEEE 802.11e développé par le IEEE 802.11e-Working-Group (2005) peut fournir une priorité de transmission au trafic de voix, il ne peut garantir un seuil maximal de délai puisque la nature du mode d'accès distribué ne peut assurer la préemption des transmissions continues du trafic de faible priorité. D'un autre côté, il est connu que le mode d'accès centralisé basé sur la fonction de coordination par point (PCF) induit une faible efficacité dans l'utilisation des ressources. Toutefois, cette méthode d'accès centralisé, contrairement à la méthode d'accès distribué DCF, peut assurer des garanties de délai strictes pour les appels de voix. Notons que les limitations de l'efficacité de la PCF sont observées seulement quand aucun trafic de voix n'existe sur le réseau, ce qui est généralement causé par la scrutation inutile des stations mobiles.

L'algorithme proposé par Sikdar (2007) fournit une expression analytique qui permet de calculer le nombre de stations mobiles actives qu'un point d'accès, opérant le mode d'accès centralisé PCF, peut accommoder sans violer une contrainte de délai ne dépassant pas un certain seuil maximal pour chacune des stations mobiles actives. Sikdar (2007) a montré qu'une configuration du paramètre d'intervalle de répétition de période libre de contentions $CFPri$ de 25 ms permet d'assurer la QoS au niveau paquet stricte pour 18 appels de voix utilisant le codec G.723.1. Dans notre travail, il nous est possible de limiter le nombre maximal d'appels de voix dans une cellule WLAN à 15 appels et cela dans le but d'avoir une période de contention minimale garantie pour le trafic d'appels de données utilisant l'accès distribué DCF. Ce schéma de partage entre la classe d'appels de voix et la classe d'appels de données permet ainsi d'implanter le schéma de partage de ressources par accès restreint initialement introduit par Naghshineh et Acampora (1996) et illustré à

la Figure 3.2. En effet, en plus de garantir une période de contention minimale, si la station mobile n'a aucune session de voix active, elle va être automatiquement enlevée de la liste de scrutation de la période libre de contention et par suite une période de contention beaucoup plus longue pourrait être allouée au trafic de données. Notons que plusieurs autres méthodes analytiques qui sortent du cadre de notre travail, ont été proposées dans Harsha *et al.* (2006) et Wang *et al.* (2006) afin de dériver la région de la capacité d'une cellule IEEE 802.11e en terme du nombre maximal d'appels de voix pouvant être admis dans la cellule en présence d'un trafic d'appels de données.

Modèle de capacité d'une cellule WiMax

L'accès multiple par division orthogonale de fréquences (OFDMA) est une technique qui divise l'espace total de transformée de Fourier rapide en un nombre de sous-canaux (ensemble de sous-porteuses qui sont allouées pour les appels de voix et de données). Rappelons que dans les réseaux WiMax l'allocation des ressources est faite dans le domaine temps-fréquence, c'est-à-dire qu'un appel peut partager un sous-canal avec d'autres usagers. Comme dans OFDMA un appel de voix requière un nombre constant k de sous-porteuses, une cellule peut avoir un maximum de N/k appels de voix sachant que N est le nombre total de sous-porteuses. Ceci étant un modèle simple pour la capacité d'une cellule WiMax en nombre d'appels de voix.

3.4 Les stratégies de sélection du réseau (SSR)

Puisque un RMHPG est généralement caractérisé par le recouvrement hiérarchique de plusieurs types de couvertures radios issues des différents réseaux mobiles hétérogènes intégrés, une station mobile multi-mode devra adopter une stratégie donnée pour sélectionner le réseau le plus adapté sur lequel elle devrait initier un nouvel appel ou sur lequel elle de-

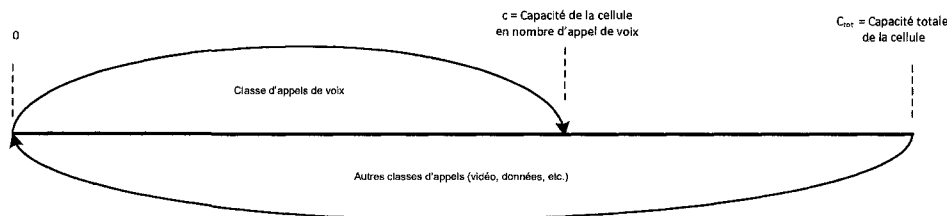


FIGURE 3.2 Schéma d'accès restreint à la capacité pour les classes de service

vrait effectuer la relève d'un appel en cours. Plusieurs stratégies de sélection du réseau (SSR) peuvent être définies obligatoirement en fonction de certains critères critiques dans le but d'assurer les contraintes de QoS tant au niveau appel qu'au niveau paquet ou encore optionnellement en fonction des préférences de l'utilisateur et/ou de l'opérateur (critères de coût, de sécurité, de balancement de charge, etc.). Pour préserver le caractère général de notre modèle, nous ne fixons pas une SSR particulière pour les nouveaux appels et ainsi n'importe quel type de critère de SSR peut être utilisé. Toutefois, dans le but de pouvoir expliciter analytiquement le modèle d'intégration des réseaux mobiles hétérogènes et des relèves verticales dans un RMHPG, nous devons choisir une SSR typique pour les appels en relèvement. À cet effet, nous utilisons la stratégie de débordement qui est une SSR couramment utilisée pour assurer la continuité des appels en permettant seulement les relèves obligatoires imminents. Cette SSR a l'avantage de minimiser le nombre de relèves verticales nécessaires au strict minimum requis pour assurer la QoS au niveau appel. Elle permet également de diminuer les dégradations de QoS au niveau paquet puisqu'elle réduit les charges et les latences élevées induites par les messages de signalisation des relèves verticales non obligatoires interdites par cette SSR. Elle a aussi l'avantage majeur d'être assez

facile à modéliser et à manipuler analytiquement. Cette SSR de débordement suppose que le trafic d'appels bloqué à un niveau inférieur, causé par des ruptures de couverture ou des refus d'admission des appels en relève à cause des surcharges éventuelles des cellules à ce niveau, déborde vers les cellules des niveaux supérieurs en effectuant des relèves verticales obligatoires vers le haut. Un exemple de SSR de débordement est illustré à la Figure 3.3. Outre le SSR de débordement, des SSR génériques permettant les relèves verticales volontaires, sont modélisées dans les équations 3.25 et 3.26 exprimant les différents taux de relèves. Dans ces équations, on définit les $\alpha_{i,j}$ comme étant les fractions des relèves volontaires.

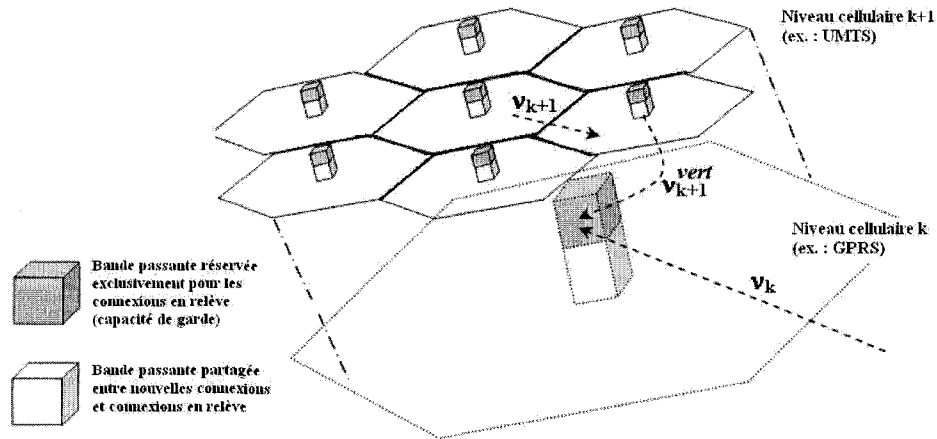


FIGURE 3.3 Relèves obligatoires dans une stratégie de débordement

3.5 Extension du modèle de trafic généralisé à un RMHPG

Sous un modèle de TRC exponentiel tel que celui utilisé pour une couverture 2.5G simple, il est facile d'exprimer les probabilités d'état à l'équilibre à partir d'une chaîne de Markov à une seule dimension en remplaçant le taux de relève horizontale λ_r par la somme

des taux de relève horizontale et verticale obligatoire $v_k + v_{k+1}^{vert}$ et en remplaçant le taux de service μ dans une cellule par la somme, plus précise, du TMA et du TMC $\mu + \eta_k$. Il est facile de montrer que puisque le TRC est supposé être exponentiel dans ce cas et que le TMA est toujours exponentiel, alors le TMC peut être modélisé par une distribution exponentielle. En effet, il est bien connu (Kleinrock, 1975) que si $TRC \sim Exp(\eta_k)$ et $TMA \sim Exp(\mu)$ alors $TMC = \min(TRC, TMA) \sim Exp(\mu + \eta_k)$, et ceci est valide pour chaque cellule de niveau k . Ainsi, pour chaque niveau cellulaire $k \in [1..N]$ du RMHPG, le développement des équations d'équilibre sous l'hypothèse d'un TRC exponentiel nous donne :

$$P_k(n) = \begin{cases} \frac{(\lambda_k + v_k + v_{k+1}^{vert})^n}{n!(\mu + \eta_k)^n} P_k(0), & 1 \leq n \leq c_k - g_k \\ \frac{(v_k + v_{k+1}^{vert})^{n-c_k+g_k} (\lambda_k + v_k + v_{k+1}^{vert})^{c_k-g_k}}{n!(\mu + \eta_k)^n} P_k(0), & c_k - g_k + 1 \leq n \leq c_k \end{cases} \quad (3.12)$$

$$\text{Où : } P_k(0)^{-1} = \sum_{i=0}^{c_k-g_k} \frac{(\lambda_k + v_k + v_{k+1}^{vert})^i}{i!(\mu + \eta_k)^i} + \sum_{i=c_k-g_k+1}^{c_k} \frac{(v_k + v_{k+1}^{vert})^{i-c_k+g_k} (\lambda_k + v_k + v_{k+1}^{vert})^{c_k-g_k}}{i!(\mu + \eta_k)^i}$$

Toutefois, Fang et Chlamtac (1999) ont montré que l'hypothèse d'un TMC et d'un TRC exponentiels n'est plus valide dans les nouveaux réseaux mobiles de nouvelle génération (3G et WLAN en sont des exemples). Dans ce cas, les estimations des probabilités de blocage peuvent présenter des imprécisions. Par conséquent, si nous ne connaissons pas les distributions exactes que nous devons utiliser pour modéliser le TMC et le TRC dans un réseau mobile hétérogène particulier, il est préférable d'utiliser une distribution générale telle que la distribution Gamma. Dans la littérature, Zeng et Chlamtac (2003) ont adopté des distributions Gamma pour modéliser le TMC et le TRC mais seulement dans un réseau cellulaire homogène à un seul niveau. Par contre, notre modélisation du trafic dans un RMHPG étend le modèle général à plusieurs niveaux hétérogènes en tenant compte ou

bien de la stratégie de débordement décrite auparavant ou bien de n'importe quelle autre SSR générique pour laquelle il est possible de formuler le taux de relèves horizontales et verticales.

Ainsi, en se basant sur les travaux de Zeng et Chlamtac (2003) sur un seul niveau cellulaire homogène, nous distinguons entre la probabilité de relève d'un nouvel appel définie par $P_h^{new,k} = \eta_k / \mu F_k(\mu)$ et la probabilité de relève d'un appel en relève définie par $P_h^{ho,k} = F_k(\mu)$ et cela pour chaque niveau cellulaire k séparé. $F_k(\mu)$ étant la transformée de Laplace de la fonction de densité de probabilité du TRC qui n'est autre que celle de la distribution Gamma. γ_k étant le paramètre de forme de la fonction Gamma, cette fonction est la suivante : $F_k(\mu) = (\frac{\gamma_k \eta_k}{\mu + \gamma_k \eta_k})_k^\gamma$

Notons que le choix d'un γ_k entier nous permet de spécialiser un TRC selon une distribution d'Erlang pouvant modéliser la mobilité dans une couverture 3G, et un $\gamma_k = 1$ nous permet de spécialiser un TRC exponentiel pouvant modéliser la mobilité dans une couverture 2G ou 2.5G. Par contre pour une couverture WLAN nous utilisons un TRC selon une distribution Gamma avec des paramètres calculés à partir de la moyenne et de la variance de la distribution hyper-exponentielle décrite précédemment. Plus loin dans ce chapitre, nous comparons les performances données par le modèle hyper-exponentiel avec celles données par le modèle généralisé Gamma.

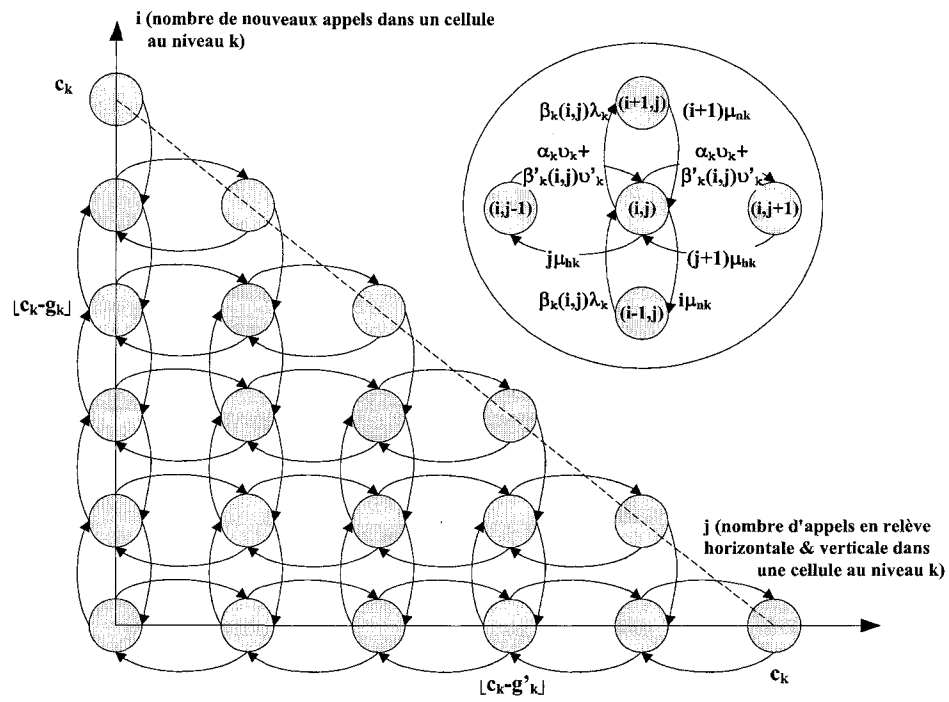
Puisque dans notre modèle de RMHPG quelconque nous utilisons un TRC généralisé selon une distribution Gamma, la propriété Markovienne peut ne plus être vérifiée et, dans ce cas, nous devons utiliser les chaînes de Markov embarquées pour résoudre notre système. Toutefois, dans le but d'offrir un moyen assez pratique et rapide pour estimer les probabilités d'état à l'équilibre, nous approximations le processus d'arrivée combinée des nouveaux appels et des appels en relève par un processus de Poisson de taux qui devrait être plus précis puisqu'il est calculé en tenant compte de la distribution non exponentielle du TRC qui fournit une meilleure approximation dans ce cas. D'un autre côté, pour le mo-

dèle d'un RMHPG typique à trois niveaux respectivement WLAN, UMTS et GPRS, nous utilisons respectivement les distributions hyper-exponentielle, Erlang et exponentielle qui sont, selon Fang (2005), des distributions préservant la propriété Markovienne. Et par suite, nos résultats pour ce modèle seront beaucoup plus précis. Notons que notre modèle généralisé est représenté par une chaîne de Markov à deux dimensions illustrée à la Figure 3.4. Dans les états de cette chaîne, nous distinguons les nouveaux appels et les appels en relèvement horizontale ou verticale puisqu'ils ont des TMC modélisés par deux distributions distinctes à cause du TRC non exponentiel.

Les équations de balance à l'état d'équilibre peuvent être facilement déduites à partir du modèle de la chaîne de Markov représentée à la Figure 3.4 et sont données explicitement dans l'Algorithme 2. Comme il est très difficile de manipuler ces équations pour trouver une forme fermée des différentes probabilités d'état d'équilibre, nous utilisons la méthode de Gauss-Seidel implantée dans l'Algorithme 2 dans le but d'estimer ces probabilités de manière itérative. Pour cela, nous initialisons les différents paramètres du système en appliquant l'Algorithme 1. Ensuite, nous commençons par des valeurs de probabilités initiales "de bonne qualité" issues du modèle exponentiel qui donne les expressions des différentes probabilités d'état sous forme fermée (équation 3.12), ce qui permet d'accélérer significativement la convergence de l'Algorithme 2 comme nous allons le voir dans les résultats. Ensuite, nous faisons des itérations sur les équations de balance jusqu'à la convergence des probabilités d'état vers leurs valeurs d'équilibre avec une résolution ou une marge d'erreur de ε près.

3.6 Expression des probabilités de blocage dans un RMHPG

Nous supposons que le contrôle d'admission de chaque réseau mobile hétérogène intégrant le RMHPG implante la politique de capacité de garde fractionnelle (CGF), une

FIGURE 3.4 Modèle d'occupation de la capacité d'une cellule au niveau k

politique d'admission générale qui peut être spécialisée en des politiques d'admission spécifiques telle que celle de la CG et de la CGFL. Selon cette politique CGF, un nouvel appel demandant l'admission à une cellule au niveau k du RMHPG est accepté dépendamment d'une certaine fonction d'acceptation des nouveaux appels $\beta_k(\cdot)$. Par conséquent, la probabilité de blocage des nouveaux appels, notée P_{b_k} , est exprimée comme suit :

$$P_{b_k} = P_{b_k}(g_k) = \sum_{i+j=0}^{c_k} \beta_k(i+j) P_{i,j,k} \quad (3.13)$$

L'admission d'un nouvel appel au RMHPG est refusée si l'admission est refusée à toutes les cellules des $J = 1$ à N niveaux en superposition dans la région de la station mobile. Cette probabilité de blocage globale dans le RMHPG s'exprime comme suit :

$$P_b = \prod_{k \in [1..J]} P_{b_k}(g_k) \quad (3.14)$$

L'admission d'un appel en relève horizontale à une cellule au niveau k du RMHPG est refusée si le nombre d'appels en cours dans cette cellule a atteint le maximum possible c_k . Dans ce cas, on parle d'échec de l'appel en relève horizontale au niveau k , ce qui peut également se produire lorsqu'il n'existe aucune cellule de niveau k au voisinage de la cellule courante à cause de la rupture de la couverture radio au niveau k . Ainsi la probabilité d'échec de l'appel en relève horizontale, notée P_{f_k} , s'exprime comme suit :

$$P_{f_k} = P_{f_k}(g_k) = (1 - P_{cov_k}) \sum_{i+j=c_k} P_{i,j,k}(g_k) + P_{cov_k} \quad (3.15)$$

P_{cov_k} étant la probabilité d'une rupture de couverture radio au niveau k .

Si nous distinguons appels en relève horizontale et appels en relève verticale, alors nous notons P_{fv_k} la probabilité d'échec des appels en relève verticale. Selon la politique CGF, un appel en relève verticale demandant l'admission à une cellule au niveau k du RMHPG est

accepté dépendamment d'une certaine fonction d'acceptation des appels en relève verticale $\beta'_k(\cdot)$. La probabilité d'échec des appels en relève verticale, notée P_{fv_k} , est exprimée comme suit :

$$P_{fv_k} = P_{fv_k}(g'_k) = \sum_{i+j=0}^{c_k} \beta'_k(i+j) P_{i,j,k} \quad (3.16)$$

Notons m_k le nombre de cellules au niveau k qui sont couvertes par une même cellule au niveau $k+1$ et cela pour chaque $k \in [1..N-1]$. L'efficacité de la couverture radio, généralement exprimée en $km^2/cellule$, est notée S_k pour chaque $k \in [1..N]$. Comme nous supposons qu'une même cellule à un niveau supérieur couvre plusieurs autres cellules sur d'autres niveaux hiérarchiques inférieurs et que ces dernières peuvent utiliser des modèles de mobilité totalement différents, alors la probabilité de rupture de la couverture radio pour une station mobile dans une cellule au niveau k dépend de la localisation de la station mobile et du modèle de mobilité utilisé dans la plus petite cellule de la région.

Nous adaptons et étendons les formules présentées dans Song *et al.* (2007) à des couvertures radio hiérarchiques multiples et hétérogènes et avec plusieurs cellules d'un niveau inférieur k recouvrant une même cellule d'un niveau $k-1$ dans un même RMHPG. Ainsi, pour une station mobile avec une vitesse moyenne v et une direction de mouvement uniformément distribuée sur $[0, 2\pi]$, le taux moyen de traversée de la frontière d'une couverture de longueur l et de superficie s , est donnée par $\eta^{cov} = \frac{vl}{\pi s}$. Désignons par $\delta_k = m_k S_k / S_{k-1}$ le ratio de la superficie de la couverture du niveau k sur celle du niveau $k-1$ et v_k le ratio de la vitesse moyenne dans la région de couverture du niveau k sur celle du niveau $k-1$ et qui est en dehors de la couverture du niveau k . Ceci suppose que l'existence d'une couverture radio d'un niveau donné est un indicateur sur un profil ou un taux de mobilité particulier de la station mobile dans la région couverte. Par exemple, à l'intérieur d'une même cellule 3G, le taux de mobilité moyen dépend de la localisation de la station mobile si elle est dans

une couverture WLAN ou non. Ainsi, nous pouvons exprimer le taux de résidence moyen dans une couverture de niveau k en fonction de celui dans une couverture de niveau $k - 1$: $\eta_k^{cov} = \frac{v_k(1-\delta_k)}{\delta_k + \sqrt{\delta_k}} \eta_{k-1}^{cov}$. La probabilité d'avoir une station mobile qui sort de la couverture du niveau k est égale au ratio de la durée moyenne passée dans la région de couverture du niveau $k - 1$ seule (ex : simple couverture 3G) sur la somme de la durée moyenne passée dans la région de couverture des deux niveaux k et $k - 1$ (ex : double couverture WLAN/3G) et de la durée moyenne passée dans la région de couverture du niveau $k - 1$ seule (ex : simple couverture 3G). Ainsi :

$$P_{cov_k} = \frac{1/\eta_{k-1}^{cov}}{1/\eta_k^{cov} + 1/\eta_{k-1}^{cov}} \quad (3.17)$$

$$= \frac{1}{1 + \frac{\delta_k + \sqrt{\delta_k}}{v_k(1-\delta_k)}} \text{ pour chaque } k \in [2..N] \quad (3.18)$$

Notons que si nous avons m_k cellules au niveau k qui couvrent toute l'étendue d'une cellule au niveau $k - 1$ alors $\delta_k = 1$ et par conséquent la probabilité de rupture de couverture au niveau k est nulle, c'est-à-dire $P_{cov_k} = 0$ puisque à chaque fois qu'on quitte une couverture de niveau k , on tombe sur une couverture de niveau $k - 1$ tant que $k > 1$. Nous posons $P_{cov_0} = 0$ afin d'avoir une couverture globale au niveau cellulaire 0. En pratique, une couverture globale se présente par une couverture relativement large dans la région étudiée comme celle de l'accès 2G/2.5G ou encore une couverture quasi planétaire comme celle de l'accès Satellite.

Probabilités de coupure d'appels dans un RMHPG

Nous exprimons la probabilité de coupure d'un appel du niveau k , c'est-à-dire la probabilité de changement forcé de niveau pour un appel en cours au niveau k d'un RMHPG multi-niveaux, notée P_{d_k} (équation 3.19), comme étant la probabilité qu'un appel initié à

ce niveau cellulaire k ait un échec de relève à ce même niveau durant son TMA. Hong et Rappaport (1986) ont dérivé le résultat suivant dans les réseaux cellulaires homogènes à un seul niveau :

$$P_{d_k} = \sum_{H_k=0}^{\infty} (P_{h_k})^{H_k} (1 - P_{f_k})^{H_k-1} P_{f_k} = \frac{P_{h_k} P_{f_k}}{1 - P_{h_k} (1 - P_{f_k})} \quad (3.19)$$

Où H_k est le nombre de relèves réussies qu'un appel effectue avant d'être rejeté du niveau cellulaire k . Dans ce qui suit, nous dérivons la probabilité de coupure ou de terminaison forcée d'un appel dans un RMHPG typique à trois niveaux intégrant WLAN (niveau $k = w$), UMTS (niveau $k = u$) et GPRS (niveau $k = g$). Nous supposons que le RMHPG implante la SSR de débordement. Soit P_c la probabilité que l'appel qui n'a pas été initialement bloqué soit terminé normalement sans aucun échec de relève. P_c est égale à la somme des probabilités des événements suivants :

- l'appel est terminé normalement dans la première cellule WLAN ;
- l'appel est terminé normalement dans une cellule WLAN après plusieurs relèves WLAN-WLAN réussies ;
- l'appel est terminé normalement dans une cellule UMTS après plusieurs relèves WLAN-WLAN, WLAN-UMTS, UMTS-UMTS, toutes réussies ;
- l'appel est terminé normalement dans une cellule GPRS après plusieurs autres relèves WLAN-WLAN, WLAN-UMTS, UMTS-UMTS, UMTS-GPRS, GPRS-GPRS, toutes réussies ;

Ainsi :

$$\begin{aligned}
P_c &= (1 - P_{h_w}) \\
&+ (1 - P_{h_w}) \sum_{i=1}^{\infty} P_{h_w}^i (1 - P_{f_w})^i \\
&+ (1 - P_{h_u}) \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^i P_{h_w}^j (1 - P_{f_w})^{j-1} P_{f_w} (1 - P_{f_{v_u}}) P_{h_u}^{i-j} (1 - P_{f_u})^{i-j} \\
&+ (1 - P_{h_g}) \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^j P_{h_w}^k (1 - P_{f_w})^{k-1} P_{f_w} P_{h_u}^{j-k} (1 - P_{f_u})^{j-k} P_{f_u} (1 - P_{f_{v_g}}) P_{h_g}^{i-j} (1 - P_{f_g})^{i-j}
\end{aligned}$$

Ces expressions sont établies en supposant qu'il n'y a pas de distinction entre appels en relève horizontale et appels en relève verticale, c'est-à-dire que les deux types d'appels ont exactement la même priorité d'accès à la capacité de la cellule. Ce qui revient à écrire : $P_{f_k} = P_{f_{v_k}}$ puisque $\beta_k(\cdot) = \beta'_k(\cdot)$.

$$\begin{aligned}
P_c &= (1 - P_{h_w}) \frac{1}{1 - P_{h_w}(1 - P_{f_w})} \\
&+ \frac{(1 - P_{h_u}) P_{f_w} P_{h_w} (1 - P_{f_u})}{[1 - P_{h_w}(1 - P_{f_w})][1 - P_{h_u}(1 - P_{f_u})]} \\
&+ \frac{(1 - P_{h_g}) P_{f_w} P_{h_w} P_{f_u} (1 - P_{f_g})}{[1 - P_{h_w}(1 - P_{f_w})][1 - P_{h_u}(1 - P_{f_u})][1 - P_{h_g}(1 - P_{f_g})]} \quad (3.20)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P_d &= 1 - P_c \\
&= \frac{P_{h_w} P_{f_w} P_{f_u} P_{f_g}}{[1 - P_{h_w}(1 - P_{f_w})][1 - P_{h_u}(1 - P_{f_u})][1 - P_{h_g}(1 - P_{f_g})]} \\
&= P_{d_w} \frac{P_{d_u} P_{d_g}}{P_{h_u} P_{h_g}} \quad (3.21)
\end{aligned}$$

En généralisant notre raisonnement à un RMHPG quelconque intégrant N réseaux mobiles hétérogènes sur N niveaux, nous pouvons facilement établir l'expression générale de

la probabilité de coupure d'appel comme étant :

$$\begin{aligned}
 P_d &= P_{h_N} \prod_{k=1}^N \frac{P_{f_k}}{[1 - P_{h_k}(1 - P_{f_k})]} \\
 &= P_{d_N} \prod_{k=1}^{N-1} \frac{P_{d_k}}{P_{h_k}}
 \end{aligned} \tag{3.22}$$

Dans le chapitre suivant, nous développons ces expressions pour différents schémas d'intégration de réseaux mobiles hétérogènes dans un RMHPG permettant de modéliser ainsi différents schémas d'allocation de la capacité en fonction du type des appels en relève : appels en relève horizontale ou appels en relève verticale.

3.7 Estimation des taux de relèves et des probabilités de blocage pour notre modèle de RMHPG généralisé

Le taux de départ des appels en relève d'une cellule donnée d'un niveau k est égale à la somme de tous les taux de trafic d'appels arrivant à cette cellule et qui sont aptes à la quitter en effectuant une relève. Deux termes contribuent à ce taux de départ de relève, noté v_k^{dep} . Le premier terme est le taux d'arrivée des nouveaux appels λ_k à chaque niveau k (fonction de la SSR adoptée pour les nouveaux appels $F^{new}(\cdot)$) avec une probabilité d'acceptation de $1 - P_{b_k}$ et une probabilité de relève de $P_{h_k}^n$. Le second terme est le taux d'arrivée des appels en relève qui est fonction de la SSR adoptée pour les appels en relève horizontale ($F^{hho}(\cdot)$) et verticale ($F^{vho}(\cdot)$).

Ainsi :

$$v_k^{dep} = \lambda_k(1 - P_{b_k})P_h^{new,k} + v_k^{arr}(1 - P_{f_k})P_h^{ho,k} + v_k^{varr}(1 - P_{f_{v_k}})P_h^{ho,k} \tag{3.23}$$

Avec : $v_k^{arr} = F_k^{hho}(v_1, v_2, \dots, v_N)$ et $v_k^{varr} = F_k^{vho}(v_1, v_2, \dots, v_N)$. Notons que les fonctions

$F_k^{hho}(\cdot)$ et $F_k^{vho}(\cdot)$ sont explicitées dans les équations 3.25 et 3.26 exprimant ainsi les différents taux de relèves en fonction de la SSR adoptée.

Pour chaque intervalle de temps durant lequel tous les taux de trafic d'appel et de mobilité sont constants, notre système Markovien est homogène, et donc à l'état d'équilibre, nous avons une conservation de flot. Le taux d'arrivée moyen des appels en relève à une cellule au niveau k est donc égale au taux moyen de départ des appels en relève de cette même cellule, c'est-à-dire $v_k^{dep} = v_k^{arr} = v_k$. D'où :

$$\begin{aligned} v_k = & F_k^{new}(\Lambda)(1 - P_{b_k})P_h^{new,k} + F_k^{hho}(v_1, v_2, \dots, v_N)(1 - P_{fk})P_h^{ho,k} \\ & + F_k^{vho}(v_1, v_2, \dots, v_N)(1 - P_{fv_k})P_h^{ho,k} \end{aligned} \quad (3.24)$$

En considérant l'uniformité spatiale du trafic des nouveaux appels, nous notons Λ le taux d'arrivée des nouveaux appels au RMHPG dans sa plus petite cellule. L'Algorithme 2 permet d'estimer les taux de relève et les différentes probabilités de blocage pour notre modèle de RMHPG généralisé avec une SSR générique. Notons que les équations 3.25 et 3.26 expriment les taux de relèves horizontales et verticales sur les différents niveaux d'un RMHPG typique intégrant WLAN, UMTS et GPRS et implantant une SSR générique qui généralise la SSR de débordement à la Figure 3.5.

$$\begin{aligned} F_1^{hho}(v_1, v_2, v_3) &= v_1 \\ F_1^{vho}(v_1, v_2, v_3) &= (1/m_1)\alpha_{2,1}v_2 + (1/m_1)(1/m_2)\alpha_{3,1}v_3 \\ F_2^{hho}(v_1, v_2, v_3) &= \alpha_{2,2}v_2 + \alpha_{2,1}v_2P_{f'_1} \\ F_2^{vho}(v_1, v_2, v_3) &= m_1P_{f_1}v_1 + (1/m_2)\alpha_{3,2}v_3 \\ F_3^{hho}(v_1, v_2, v_3) &= \alpha_{3,3}v_3 + \alpha_{3,2}v_3P_{f'_2} + \alpha_{3,1}v_3P_{f'_1} \\ F_3^{vho}(v_1, v_2, v_3) &= m_1m_2P_{f_1}P_{f_2}v_1 + m_2P_{f_2}v_2 + v_3 \end{aligned} \quad (3.25)$$

$$\begin{aligned}
\alpha_{3,1} + \alpha_{3,2} + \alpha_{3,3} &= 1 \\
\alpha_{2,1} + \alpha_{2,2} &= 1 \\
\alpha_{1,1} &= 1
\end{aligned} \tag{3.26}$$

Algorithm 1 Initialisation des paramètres du RMHPG

ENTRÉES: Les paramètres de trafic pour chaque niveau cellulaire k : λ_k, μ, η_k et γ_k
ENTRÉES: Les paramètres du RMHPG : c_k, g_k, g'_k, m_k, S_k
SORTIES: Trouver la fonction β_k (β'_k) qui exprime la probabilité d'acceptation d'un nouvel appel (d'un appel en relève verticale) en fonction du nombre d'appels déjà admis définissant une capacité de garde fractionnelle limitée ainsi que les paramètres du TRC généralisé

- 1: **POUR** chaque niveau k de 1 à N **FAIRE**
- 2: // Construire $\beta_k(\cdot)$ à partir de g_k
- 3: $i \leftarrow 0$
- 4: **TANT QUE** $i < c_k - g_k$ **FAIRE**
- 5: $\beta_k(i) \leftarrow 1$
- 6: $i \leftarrow i + 1$
- 7: **FIN TANT QUE**
- 8: $\beta_k(i) \leftarrow \lceil g_k \rceil - g_k$
- 9: $i \leftarrow i + 1$
- 10: **TANT QUE** $i \leq c_k$ **FAIRE**
- 11: $\beta_k(i) \leftarrow 0$
- 12: $i \leftarrow i + 1$
- 13: **FIN TANT QUE**
- 14: Exécuter la même procédure pour construire $\beta'_k(\cdot)$ à partir de g'_k
- 15: // Déterminer les paramètres du TRC généralisé
- 16: $f_k(\mu) \leftarrow (\gamma_k \eta_k / (\mu + \gamma_k \eta_k))_k^\gamma$
- 17: $\mu_{nk} \leftarrow \mu^2 / (\mu - \eta_k(1 - f_k(\mu)))$
- 18: $\mu_{hk} \leftarrow \mu / (1 - f_k(\mu))$
- 19: $P_h^{new,k} = (\eta_k / \mu)(1 - f_k(\mu))$
- 20: $P_h^{ho,k} = f_k(\mu)$
- 21: **FIN POUR**

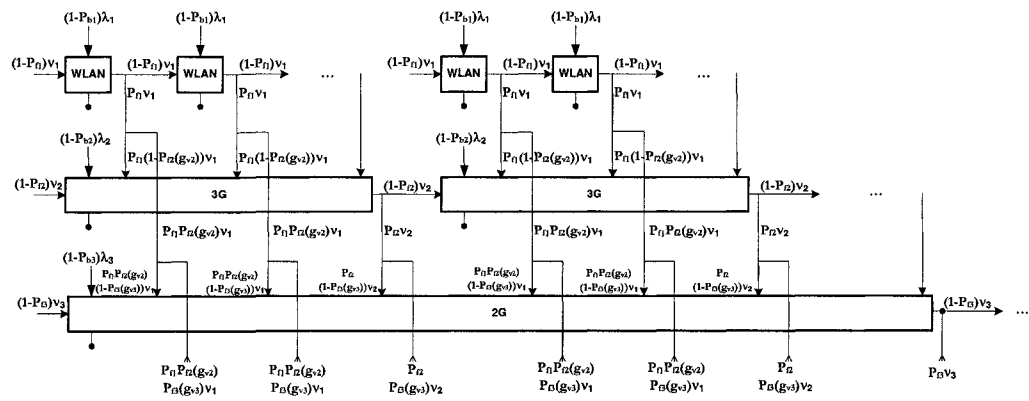


FIGURE 3.5 Trafic d'appels dans un RMHPG

Algorithm 2 Estimation des probabilités de blocage sous un modèle généralisé de RMHPG

ENTRÉES: Les paramètres de trafic pour chaque niveau cellulaire k : λ_k, μ, η_k et γ_k

ENTRÉES: Les paramètres du RMHPG : $c_k, \alpha_{k,k}, \beta_k(\cdot), \beta'_k(\cdot), m_k, S_k$

SORTIES: $P_{b_k}, P_{f_k}, P_{f'_k}$ et P_{d_k} pour chaque niveau cellulaire k

```

1: Appeler Algorithme 1
2: Initialiser  $v_k \leftarrow 0, k = 1..N$ 
3: TANT QUE tous les taux de relève  $v_k, k = 1..N$  n'ont pas encore convergé vers leurs
   valeurs respectives à l'équilibre à une résolution près  $\varepsilon_v$  FAIRE
4:   POUR chaque niveau  $k$  de 1 à  $N$  FAIRE
5:     // Estimer les probabilités  $P_{b_k}$  et  $P_{f_k}$  en utilisant l'algorithme de Gauss-Seidel
6:     TANT QUE  $(\max_i \max_j |P_k(i, j) - P_k^{anc}(i, j)| > \varepsilon_p)$  FAIRE
7:        $P_k^{anc}(i, j) \leftarrow P_k(i, j)$  for all  $(i, j) \in [0..c_k]^2$ 
8:        $P_{b_k} \leftarrow 0$  et  $P_{f_k} \leftarrow 0$ 
9:       POUR  $i=0$  to  $c_k$  FAIRE
10:        POUR  $j=0$  to  $c_k$  FAIRE
11:          SI  $0 \leq i+j < c_k$  ALORS
12:             $P_k(i, j) \leftarrow (\beta_k(i+j-1)\lambda_k P_k(i-1, j) + (i+1)\mu_{nk} P_k(i+1, j) + (\alpha_{k,k}v_k + \beta'_k(i+j-1)v'_k)P_k(i, j-1) + (j+1)\mu_{hk} P_k(i, j+1)) / (\beta_k(i+j)\lambda_k + \alpha_{k,k}v_k + \beta'_k(i+j)v'_k + i\mu_{nk} + j\mu_{hk})$ 
13:          SINON SI  $i+j \geq c_k - g_k$  ALORS
14:             $P_{b_k} \leftarrow P_{b_k} + (1 - \beta_k(i+j))P_k(i, j)$ 
15:             $P_{f'_k} \leftarrow P_{b_k} + (1 - \beta'_k(i+j))P_k(i, j)$ 
16:          SINON SI  $i+j = c_k$  ALORS
17:             $P_k(i, j) \leftarrow (\beta_k(i+j-1)\lambda_k P_k(i-1, j) + (\alpha_{k,k}v_k + \beta'_k(i+j-1)v'_k)P_k(i, j-1)) / (i\mu_{nk} + j\mu_{hk})$ 
18:             $P_{b_k} \leftarrow P_{b_k} + (1 - \beta_k(i+j))P_k(i, j)$ 
19:             $P_{f'_k} \leftarrow P_{b_k} + (1 - \beta'_k(i+j))P_k(i, j)$ 
20:             $P_{f_k} \leftarrow P_{f_k} + P_k(i, j)$ 
21:          FIN SI
22:        FIN POUR
23:      FIN POUR
24:       $P_{f_k} \leftarrow (1 - P_{cov_k})P_{f_k} + P_{cov_k}$ 
25:      Calculer  $P_{d_k}$  qui dépend de la SSR choisie
26:    FIN TANT QUE
27:    // Estimer les taux d'arrivée des nouveaux appels à une cellule au niveau  $k$ 
28:     $\lambda_k \leftarrow F_k^{new}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N)$ 
29:    // Estimer les taux d'arrivée des appels en relève sortant d'une cellule au niveau  $k$ 
30:     $v_k \leftarrow \lambda_k(1 - P_{b_k})P_h^{new,k} + F_k^{hho}(v_1, v_2, \dots, v_N)(1 - P_{f_k})P_h^{ho,k} + F_k^{vho}(v_1, v_2, \dots, v_N)(1 - P_{f'_k})P_h^{ho,k}$ 
31:  FIN POUR
32: FIN TANT QUE

```

3.8 Résultats analytiques et interprétations

Dans le but d'étudier les performances fournies par le cadre générique de modèles et algorithmes que nous proposons dans ce chapitre, nous considérons l'étude d'un RMHPG typique qui intègre les trois technologies d'accès les plus populaires : GPRS, UMTS et WLAN.

3.8.1 Paramètres du RMHPG typique étudié

Nous étudions le RMHPG intégrant WLAN, UMTS et GPRS dans une région dense dans laquelle $m_u = 7$ micro-cellules UMTS sont couvertes par une macro-cellule GPRS et que chacune de ces micro-cellules couvre $m_w = 7$ pico-cellules WLAN. Pour l'évaluation des performances, nous fixons des valeurs très communément utilisées pour les différents paramètres du TRC dans chacune des cellules hétérogènes comme présenté au Tableau 3.1. Notons que des valeurs assez réalistes du TRC dans les cellules WLAN sont extraites d'une étude récente sur le trafic dans les réseaux WLAN réalisée par Thajchayapong et Peha (2006). En outre, la valeur communément utilisée dans des études similaires pour la durée moyenne d'un appel (TMA) est de 4 mn. Pour le taux d'arrivée du trafic λ_k , nous avons utilisé la même valeur de 3 appels/mn pour tous les niveaux cellulaires hétérogènes puisque nous supposons que les performances sont étudiées pour des stations mobiles tri-mode, c'est-à-dire ayant les trois interfaces radio GSM/GPRS, WCDMA/UMTS et 802.11e/PCF. D'un autre côté, puisque λ_k est le même pour chaque niveau cellulaire et étant donné la répartition des cellules avec leurs différentes tailles sur les différents niveaux, nous exprimons ainsi les diverses densités dans les différentes régions de couverture. Nous supposons que les capacités des cellules en terme de nombre maximal d'appels de voix sont respectivement égales à 10, 15 et 20 pour GPRS, UMTS et WLAN respectivement. Chang *et al.* (1999) ont considéré une stratégie de débordement dans un système cellulaire hiérarchique homogène

sous un modèle de TRC exponentiel et ont montré que les macro-cellules doivent implanter des capacités de garde plus élevées que celles implantées par les micro-cellules. Cette situation est semblable à celle de notre RMHPG puisque les macro-cellules GPRS forment la plus grande couverture et doivent supporter un trafic en débordement qui est plus élevé que celui supporté par des micro-cellules UMTS ou des pico-cellules WLAN. Par conséquent, et après quelques tests préliminaires de la performance du RMHPG (Ben Ali et Pierre, 2007), nous fixons les capacités de gardes entières suivantes : 4, 3 et 0 respectivement pour GPRS, UMTS et WLAN. Notons que l'absence de capacité de garde au niveau WLAN dans ce cas ne devrait pas provoquer une détérioration notable de la probabilité de coupure d'appel puisque la mobilité et le taux de relève sont très faibles à ce niveau de la hiérarchie cellulaire. D'un autre côté, il n'est pas obligatoire de modifier le protocole standard 802.11e pour distinguer entre requêtes d'admission provenant des nouveaux appels et requêtes d'admission provenant des appels en relève.

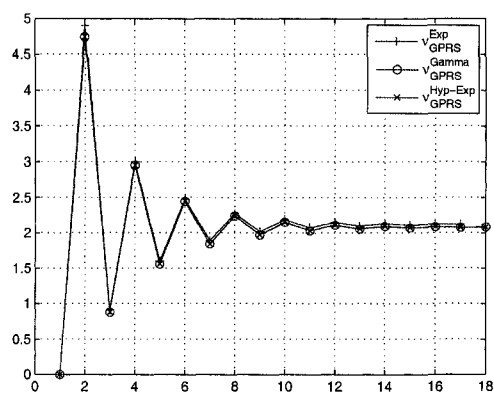
TABLEAU 3.1 Paramètres du TRC caractérisant les cellules hétérogènes

Accès k	$E[TRC]=1/\eta_k$	Écart type du TRC σ_k	Distributions
GPRS	modérée (3 mn)	modérée (3 mn)	Exp. , Gamma(1)
UMTS	faible (1 mn)	faible (0.33 mn)	Exp. , Gamma(9), Erlang
WLAN	grand (50 mn)	grand (1200 mn)	Exp. , Gamma(0.0017), Hyper-Exp.

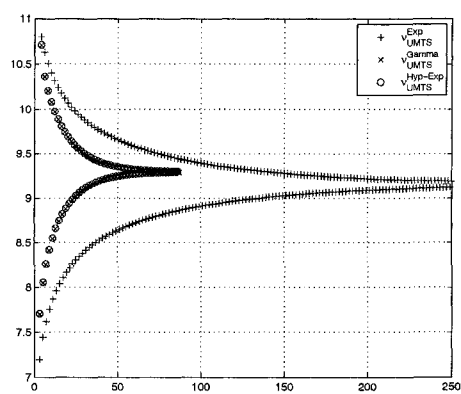
3.8.2 Convergence des taux de relèves

Les résultats montrés à la Figure 3.6 indiquent que l'algorithme du point de fixe utilisé pour calculer les taux de relève à l'état d'équilibre converge vers différentes valeurs pour chaque niveau $k \in \{GPRS, UMTS, WLAN\}$. Nous remarquons qu'au niveau UMTS, le taux de relève horizontale converge lentement vers le taux le plus élevé, entre 9 et 9.5 appels/mn comme illustré à la Figure 3.6b. Ceci est conforme avec les caractéristiques des

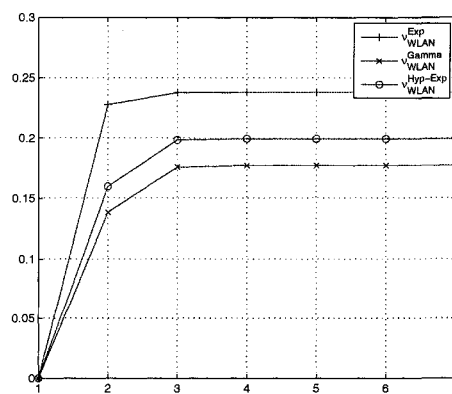
cellules UMTS présentées aux tableaux 2.1 et 3.1, c'est-à-dire des cellules de petites tailles dans lesquelles les stations mobiles ont une mobilité relativement élevée. Par contre, au niveau WLAN le taux de relève horizontale converge vers le taux le moins élevé, entre 0.15 et 0.25 appels/mn tel qu'indiqué à la Figure 3.6c. Ceci est conforme avec les caractéristiques des cellules WLAN, c'est-à-dire des cellules de petites tailles dans lesquelles les stations mobiles ont une mobilité relativement faible. La Figure 3.7 montre que le taux de relève verticale le plus élevé est celui du trafic qui déborde du niveau UMTS (incluant celui qui déborde du niveau WLAN) vers le niveau GPRS ($v_{UMTS/GPRS}^{vert} = 0.75$ appels/mn). Cette même Figure 3.7 montre que durant la période transitoire de l'algorithme de la fonction du point de fixe, si le taux de relève horizontale augmente, le taux de relève verticale correspondant diminue et vice-versa. Ceci confirme l'effet des probabilités de blocage dans le calcul des taux de relève effectifs, ce qui n'est pas généralement considéré dans la plupart des modèles utilisés dans la littérature. En effet, notre modèle se trouve ainsi plus précis puisque au lieu de fixer les valeurs de taux de relèves comme des paramètres du problème qui peuvent être inconsistants avec les autres paramètres, nous utilisons cet algorithme de convergence du point fixe pour calculer les valeurs réelles de ces taux en fonction des autres paramètres du système. Notons que cet algorithme du point fixe est relancé à chaque début d'intervalle de temps de changement des taux moyens du trafic d'appel et de mobilité ou encore suite à l'ajustement des capacités de garde dynamiques par l'algorithme de contrôle d'admission optimal proposé dans le chapitre suivant. L'estimation des taux de relèves en utilisant divers modèles de mobilité pour le TRC dans les différentes cellules hétérogènes du RMHPG, illustrée à la Figure 3.6 montre que le taux de relève dans les cellules WLAN est le taux le plus affecté par la distribution du TRC utilisée dans le modèle de mobilité. En effet, une distribution exponentielle très souvent utilisée dans la littérature sur-estime le taux de relève WLAN et une distribution Gamma utilisée dans le cadre d'un modèle général, comme celui que nous proposons dans ce chapitre, sous-estime ce même taux



(a) Niveau GPRS



(b) Niveau UMTS



(c) Niveau WLAN

FIGURE 3.6 Convergence des taux de relève sous divers modèles de TRC

de relève WLAN. La distribution hyper-exponentielle est celle qui donne les valeurs les plus proches de la réalité selon l'étude de Thajchayapong et Peha (2006). Pour le niveau UMTS, les distributions Gamma et hyper-exponentielle donnent des taux de relève UMTS assez proches alors qu'une distribution exponentielle sous-estime le taux de relève UMTS et donne une fonction de point fixe qui converge plus lentement que ceux qui se basent sur les autres distributions. Finalement, étant donné la validité de la distribution exponentielle pour modéliser le TRC dans les cellules GPRS, les autres distributions donnent exactement les mêmes taux de relève GPRS.

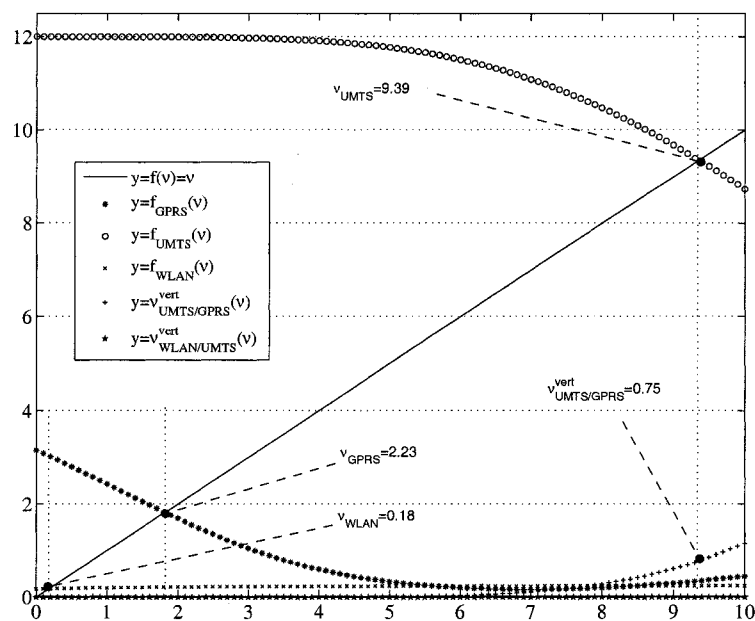


FIGURE 3.7 Convergence des fonctions du point fixe pour les taux de relèves

3.8.3 Effets de la distribution du TRC sur les performances du RMHPG

Nous étudions les performances du système intégrant WLAN, UMTS et GPRS sous différentes distributions du TRC et en fonction de la charge du réseau WLAN. Nous présentons les résultats de cette étude de performance à la Figure 3.8. Cette Figure 3.8 montre qu'une distribution Gamma du TRC dans une cellule UMTS fournit des résultats de performance différents de ceux données par une distribution exponentielle. Ceci confirme le fait que le modèle exponentiel standard n'est plus valide pour modéliser le TRC dans les réseaux mobiles UMTS. D'un autre côté, il n'y a pas de différence entre les probabilités de blocage et d'échec de relève données par une distribution hyper-exponentielle et ceux données par une distribution Gamma. Ceci est dû au fait que la distribution exponentielle ne prend qu'un seul paramètre de moyenne pour capturer le TRC. Alors que les différentes probabilités de blocage et d'échec de relève sont sensibles à un deuxième paramètre, en plus de la moyenne, qui permet de capturer la variabilité du TRC dans les cellules UMTS.

Étant donné le très faible taux de relève au niveau WLAN causé par un TRC moyen assez élevé par rapport au temps moyen de maintien d'un appel TMA, nous considérons une configuration dans laquelle le réseau WLAN n'implémente aucune capacité de garde comme illustré à la Figure 3.9a et une autre configuration dans laquelle celui-ci implémente une capacité de garde très faible d'un seul appel de voix tel que montré à la Figure 3.9b. Les résultats sur ces figures montrent qu'une très faible augmentation de la capacité de garde du WLAN augmente significativement les différentes probabilités de blocage et d'échec de relève. En outre, la Figure 3.9 montre que la différence entre les résultats de performance donnés par une distribution hyper-exponentielle et ceux donnés par une distribution Gamma se trouve accentuée et devient de plus en plus importante lorsque le paramètre de variabilité du TRC du WLAN diminue de 10^0 à 10^{-3} , ce qui est traduit par une augmentation de la variance du TRC. De cette même figure, nous présentons les résultats de

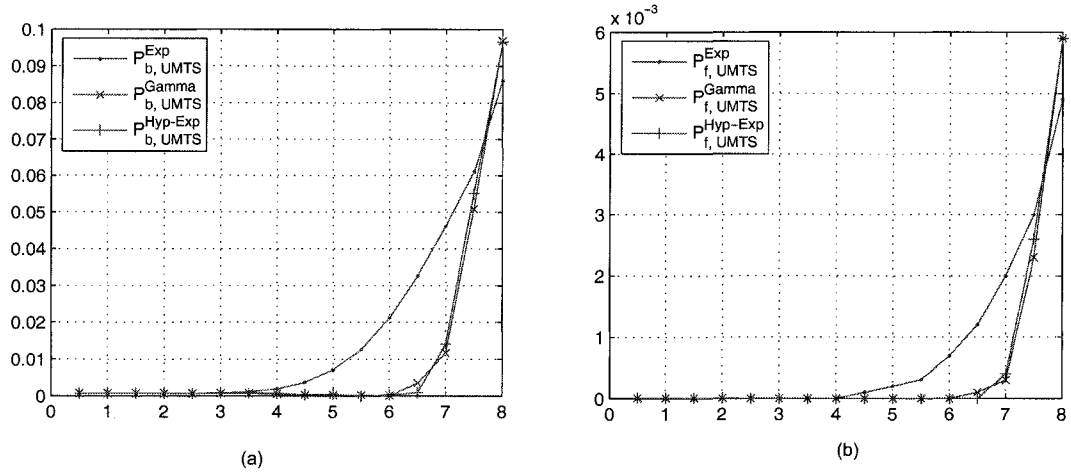


FIGURE 3.8 Effet du modèle du TRC sur le blocage UMTS en fonction de la charge

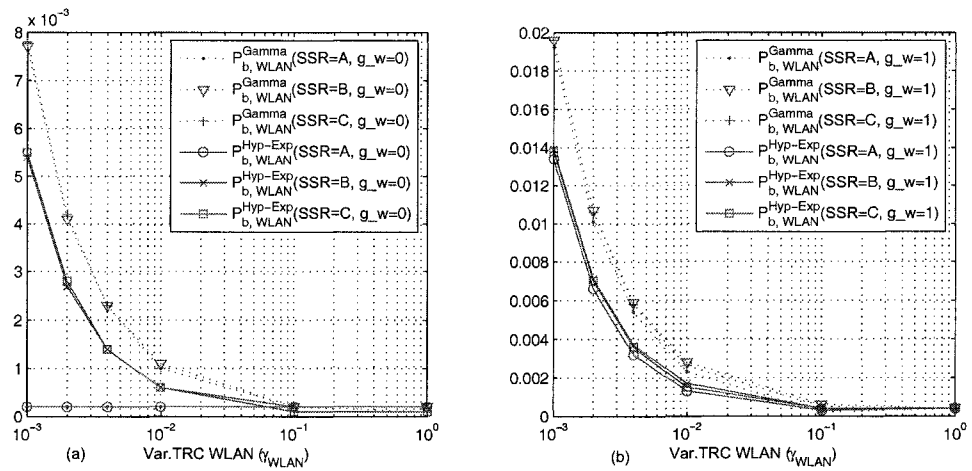


FIGURE 3.9 Probabilité de blocage WLAN en fonction de la variabilité du TRC

performance pour trois scénarios de stratégies de sélection du réseau (SSR). Le premier scénario, noté A, réfère à la SSR de débordement qui ne permet que les relèves horizontales et verticales obligatoires qui assurent la continuité des appels. Le deuxième scénario, noté B, réfère à une SSR qui permet quelques relèves verticales volontaires limitées à une fraction $\alpha = 5\%$ de toutes les relèves. Le troisième scénario, noté C, réfère à une SSR qui est la même que la précédente (SSR B) sauf qu'elle ne permet pas les relèves horizontales entre cellules WLAN en considérant chaque cellule WLAN comme un "hotspot" isolé de ses voisins éventuels. Les résultats montrent que les scénarios A, B et C donnent les mêmes probabilités de blocage des nouveaux appels au niveau WLAN pour toutes les variabilités du TRC du WLAN.

Notons aussi que la Figure 3.9 nous montre qu'une distribution hyper-exponentielle de la TRC du WLAN fournit une probabilité de blocage des nouveaux appels qui est plus faible que celle fournie par une distribution Gamma et beaucoup plus élevée que celle fournie par une distribution exponentielle (illustrée comme cas particulier d'un paramètre de variabilité égale à 10^0). La différence se trouve accentuée lorsque le paramètre de variabilité diminue de 10^0 à 10^{-3} . Rappelons que la distribution hyper-exponentielle de la TRC du WLAN est la plus adaptée à ce type de réseaux puisqu'elle tient compte de l'effet Pareto observé par Thajchayapong et Peha (2006) dans les réseaux WLAN. Ainsi, si nous estimons les performances sous le modèle Gamma utilisé pour notre cadre générique, nous pouvons augmenter la capacité de garde dans un système réel en gardant les mêmes résultats de performance qui sont plus précis sous le modèle hyper-exponentiel.

Ainsi, étant donné les différentes variabilités du temps de résidence cellulaire, les probabilités de blocage sous le modèle exponentiel sont sur-estimées pour les cellules UMTS et largement sous-estimées (invalides même) pour les cellules WLAN. De plus, ces probabilités de blocage sont sur-estimées sous le modèle Gamma pour les cellules WLAN.

3.9 Conclusion

Nous avons développé un nouveau modèle de trafic d'appels pour les RMHPG en utilisant des distributions plus généralisées représentant un TRC plus réaliste ainsi que des taux de relèves plus précis en considérant les probabilités de blocage et d'échec de la relève dans leur estimation. Les résultats numériques montrent que le modèle standard exponentiel sous-estime largement les probabilités de blocage du WLAN et de l'UMTS comparativement au modèle général Gamma et au modèle précis hyper-exponentiel qui tiennent compte tout les deux de la variabilité du TRC. Ceci rend ce modèle exponentiel obsolète dans ces types de réseaux mobiles. L'utilisation de modèles plus précis dans un RMHPG permet non seulement de donner des métriques de performance plus exactes, mais aussi, en utilisant ces métriques plus précises, d'ajuster des capacités de garde plus efficaces grâce à un contrôle d'admission optimal qui sera conçu et développé dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 4

INTÉGRATION 3G/WLAN ET PERFORMANCES DU CONTRÔLE D'ADMISSION OPTIMAL DE VOIX

Dans un futur proche, la voix sur WLAN (VoWLAN) va fort probablement gagner une très grande popularité. Toutefois, la couverture souvent très limitée des réseaux WLAN constitue encore une majeure limitation pour offrir l'ubiquité nécessaire aux usagers mobiles de la voix sur IP. Toutefois, il est possible de contourner cette limitation en intégrant les réseaux WLAN avec des réseaux à larges couvertures tels que les réseaux cellulaires 3G. Ainsi, dans ce chapitre, nous allons étudier les performances d'un contrôle d'admission optimal de voix redéfini pour un RMHPG typique intégrant réseau 3G et réseau WLAN selon différents schémas d'intégration.

Dans un premier temps, nous spécialisons notre modèle générique proposé dans le chapitre précédent à une architecture d'intégration à deux niveaux 3G et WLAN très adéquats pour supporter un service de voix sur IP et nous développerons une étude analytique adaptée à différents schémas d'intégration. Ensuite, nous proposons un modèle de contrôle d'admission optimal pour la voix dans un réseau 3G/WLAN intégré. Puis, nous présentons et interprétons les résultats de performance du contrôle d'admission optimal de voix en fonction du schéma d'intégration entre réseau 3G et réseau WLAN. Et finalement, nous terminons le chapitre avec une conclusion.

4.1 Analyse du réseau 3G/WLAN intégré

Cette dernière décennie, la technologie des réseaux locaux sans fil WLAN selon les standards IEEE 802.11 a été largement déployée dans plusieurs endroits tels que campus,

locaux d'entreprises, cafés, aéroports, etc. Aujourd'hui, cette technologie connaît encore un essor fulgurant grâce à la flexibilité, la bande passante élevée, le faible coût et la mobilité qu'elle offre. D'un autre côté, la voix sur IP est devenue l'une des technologies Internet ayant l'un des plus forts taux de croissance à cause non seulement de son efficacité dans l'utilisation de la bande passante par multiplexage statistique mais aussi à cause de son faible coût. La convergence de ces deux technologies en un service de voix sur WLAN (VoWLAN) est en train de gagner en popularité et va être encore plus populaire si les usagers multi-mode vont avoir accès à un service mobile de voix sur IP qui s'étend au delà de la couverture limitée du WLAN grâce à une intégration efficace entre réseau 3G et réseau WLAN.

4.1.1 Défis et motivations

La voix sur IP sur les réseaux WLAN actuels souffre encore d'un certain nombre de problèmes de QoS puisque l'accès distribué DCF couramment utilisé non seulement ne garantit pas les contraintes de délai de transmission mais aussi il ne permet pas d'effectuer des relèves sans coupures. Ces problèmes ont ouvert récemment un domaine de recherche très actif. En effet, plusieurs travaux récents (View, 2005; Shen *et al.*, 2006) se sont intéressés à résoudre les problèmes de support de QoS au niveau paquet pour le service VoWLAN en proposant des mécanismes de contrôle d'admission efficaces mais sans support de la mobilité. D'autres travaux (Pack *et al.*, 2007) se sont attaqués aux procédures de relèves rapides utilisant des techniques de "scanning" intelligent et des techniques de découverte rapide des points d'accès pour le support de la continuité de la QoS au niveau paquet lors des relèves WLAN. Cependant, des études de performance dans plusieurs propositions récentes ont montré qu'il est possible de fournir une relève rapide adéquate pour la mobilité des usagers du service VoWLAN (Pack *et al.*, 2007). En outre, avec la popularité sans cesse crois-

sante des stations mobiles multi-mode, tels que les nouveaux assistants personnels (PDA) et les téléphones intelligents (smartphones) qui sont équipés avec au moins deux interfaces radio : WLAN et cellulaire 3G, les usagers de la voix sur IP sur ces stations mobiles multi-mode vont profiter en même temps du faible coût de l'accès rapide WLAN ainsi que de la couverture ubiquitaire des réseaux cellulaires 3G. À cet effet, les réseaux WLAN et les réseaux 3G doivent inter-opérer selon un certain schéma d'intégration ou de couplage dans le but de fournir la continuité des appels de voix. Plusieurs schémas d'intégration ont été déjà présentés dans les chapitres précédents mais n'ont pas été étudiés en détail et dans le cas particulier d'une intégration 3G/WLAN.

Dans un contexte d'ouverture des réseaux inter-opérables, l'intégration des réseaux 3G et des réseaux WLAN risque d'engendrer un effondrement du réseau cellulaire 3G par une hausse des probabilités de blocage si aucun réajustement des paramètres de contrôle d'admission ou aucune re-planification des ressources cellulaires n'est considéré à l'avance. Généralement, les mécanismes présentés dans le chapitre 2 pour l'adaptation dynamique de la capacité de garde au niveau cellulaire 3G ne vont entrer en jeu pour optimiser les performances que lorsqu'il y a un changement dans les paramètres de taux d'appels et de mobilité connue dans le réseau 3G. Ainsi, le trafic d'appels en relève verticale n'est pas pris en compte par les modèles existants dans les réseaux cellulaires, ce qui soulève bien des problèmes lorsqu'un opérateur mobile 3G a besoin de prédire précisément les performances projetées de son réseau 3G en conséquence d'une éventuelle intégration future avec le réseau WLAN d'un autre fournisseur/opérateur.

Il est bien connu que dans certains endroits (certains locaux et stationnements souterrains, tunnels, ascenseurs, etc.) qu'on appelle "zones mortes", le signal radio du réseau cellulaire s'affaiblit jusqu'à provoquer une coupure de l'appel en cours. Il est possible de profiter de l'intégration d'un réseau WLAN pour contrer la rupture singulière de la couverture 3G dans ces endroits intérieurs. D'un autre côté, un opérateur WLAN a besoin

de maximiser le nombre d'appels de voix acceptés par son réseau pour diminuer les frais d'utilisation d'un réseau cellulaire 3G externe en limitant l'itinérance au strict nécessaire pour garantir la continuité de service dans les régions non couvertes par le WLAN. Par conséquent, en tenant compte de cette intégration, l'opérateur WLAN doit lui aussi ajuster ses paramètres de contrôle d'admission pour garantir des paramètres de QoS au niveau appel et au niveau paquet.

Étant donné qu'il y a différents schémas d'intégration possibles entre réseau 3G et réseau WLAN tel qu'il a été présenté dans le chapitre 2, les performances du RMHPG ainsi intégré peuvent varier en fonction du schéma d'intégration choisi. Ainsi, dans le but de prédire les performances afin d'évaluer les gains/pertes d'un certain type d'intégration choisie entre 3G et WLAN, nous avons besoin de spécialiser le cadre générique proposé au chapitre précédent pour le cas précis d'un RMHPG intégrant réseau 3G et réseau WLAN et nous devons analyser ses performances pour chaque schéma d'intégration.

4.1.2 Schémas d'intégration pour l'allocation des ressources radio aux appels en relève verticale

Généralement, dans une architecture d'intégration faible entre réseau WLAN et réseau 3G comme illustré à la Figure 4.1a, c'est-à-dire une interconnexion au niveau du réseau de cœur IP implantée souvent entre deux opérateurs distincts ou deux domaines administratifs distincts, le réseau cellulaire 3G ne peut pas avoir une connaissance de la nature radio de l'appel. Il ne peut donc pas déterminer si c'est un appel en relève verticale provenant d'un réseau externe ou si c'est un nouvel appel. Par conséquent, il n'aura le choix que de traiter l'appel en relève verticale comme un nouvel appel. Ceci est d'autant plus vrai lorsque l'architecture d'interconnexion implante un gestionnaire de ressources radio distribué (DRRM) se basant sur les politiques présentées à la Figure 4.1a qui se trouve être le

plus adapté pour une intégration faible offrant la flexibilité et l'interopérabilité de différents réseaux appartenant à différents opérateurs. Notons que dans ce cas d'intégration faible, un gestionnaire de ressources radio centralisé n'est pas approprié puisqu'il induit une latence d'admission très élevée étant donné le très long chemin de communication entre les stations mobiles et le premier équipement central d'interconnexion des deux réseaux.

Par contre, dans une architecture d'intégration forte illustrée à la Figure 4.1b, c'est-à-dire une interconnexion au niveau du réseau d'accès radio adoptée souvent par un même et seul opérateur ou domaine administratif, il est possible que le réseau radio 3G reconnaisse un appel en relève verticale par le biais d'une signalisation radio spécifique entre les deux réseaux radios WLAN et 3G. En effet, cette signalisation radio devrait avoir une assez faible latence pour gérer et admettre rapidement les appels en relève verticale grâce à un gestionnaire de ressources radio centralisé (CRRM) au niveau du contrôleur radio 3G situé dans un emplacement très proche des stations mobiles et ayant une bonne connaissance des différents états privés du réseau radio hétérogène intégré de l'opérateur. Et, dans ce cas, il est possible de distinguer un appel en relève verticale d'un nouvel appel et lui donner ainsi plus ou moins de ressources radio en fonction des requis de QoS au niveau appel.

Outre les deux schémas d'allocation de ressources strictes pour les appels en relève verticale (traités comme de nouveaux appels à la Figure 4.2a et comme des appels en relève horizontale à la Figure 4.2c), il est possible d'avoir un troisième schéma d'allocation de ressources qui est plus général et dans lequel nous définissons un niveau de garde séparé $g'_i \in]g_i, c_i[$ pour que les appels en relève verticale aient une certaine priorité d'accès aux ressources radio qui est adjustable entre le niveau le plus bas g_i de celle des nouveaux appels et le niveau le plus haut c_i de celles des appels en relève horizontale. Ce schéma de gestion de ressources correspond à une intégration plus ou moins forte entre WLAN et 3G.

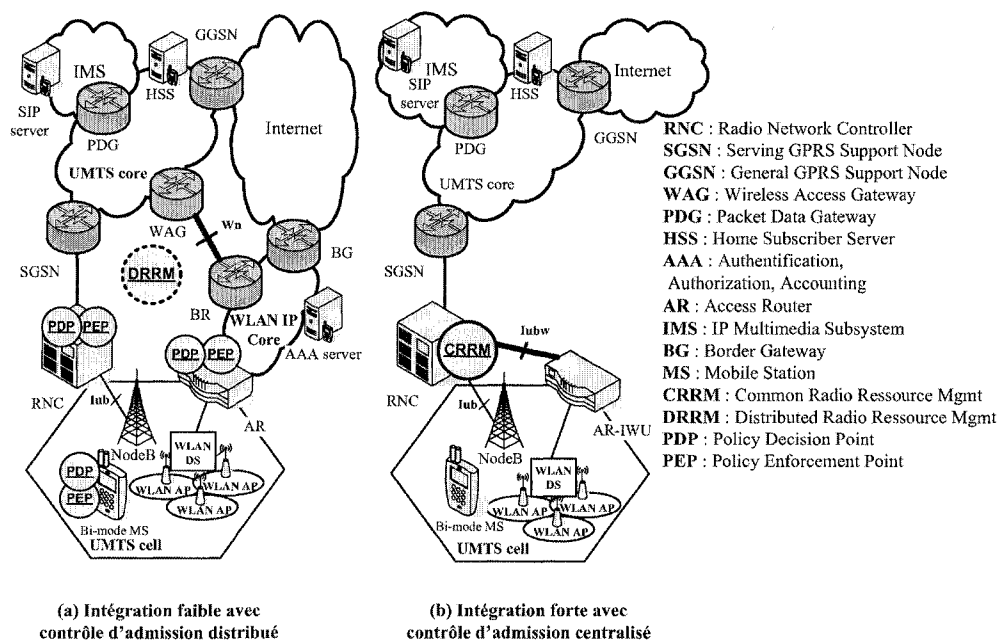


FIGURE 4.1 Schémas d'intégration et de gestion des ressources du WLAN/3G

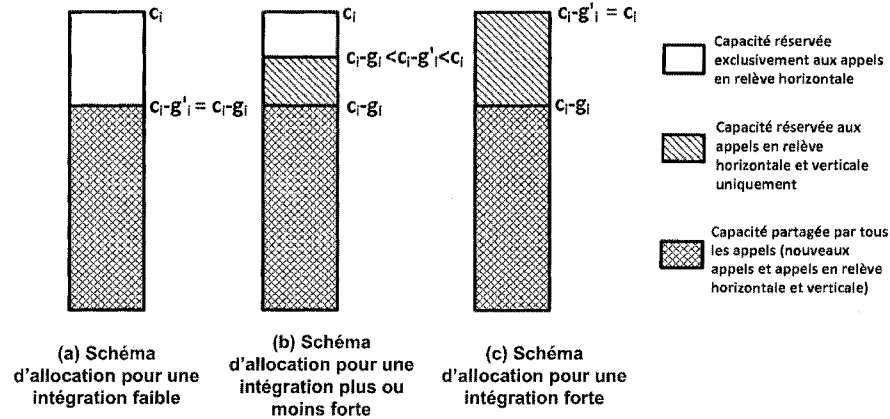


FIGURE 4.2 Schémas d'allocation de la capacité d'une cellule aux appels en relèvement verticale

4.1.3 Modèle d'occupation de ressources et probabilités d'état à l'équilibre

Un peu comme dans le chapitre précédent, nous utilisons la chaîne de Markov à deux dimensions présentée à la Figure 3.4 pour modéliser avec une bonne précision l'occupation de la capacité d'une cellule WLAN (respectivement une cellule 3G) en terme de nombre d'appels de voix servis par la cellule, et cela malgré que le temps de service, c'est-à-dire le TMC, n'est pas exponentiel. En effet, selon Fang (2005), les distributions Hyper-exponentielles et les distributions d'Erlang gardent la propriété Markovienne nécessaire pour développer une chaîne de Markov avec une bonne précision et sans recours à des approximations comme dans le cas d'un TMC généralisé selon une distribution Gamma. Il est possible de dériver les équations de balance de la chaîne de Markov, puis d'utiliser l'approche de Gauss-Seidel présentée au chapitre précédent pour estimer itérativement les probabilités d'états jusqu'à la convergence vers leur valeurs à l'équilibre. Rappelons que nous utilisons cette approche puisqu'il n'existe aucune expression analytique qui peut

donner directement ces valeurs.

4.1.4 Probabilités de blocage

En utilisant les probabilités d'état ainsi estimées et en appliquant la politique d'admission de la capacité de garde fractionnelle limitée (CGFL), nous exprimons les probabilités de blocage du réseau 3G/WLAN en fonction du schéma d'intégration implanté pour l'allocation de ressources radio aux appels en relève verticale.

- La probabilité de blocage d'un nouvel appel de voix dans une cellule WLAN :

$$P_b^w = \sum_{i+j=0}^{c_w} \beta_w(i+j) P_{i,j,w} \quad (4.1)$$

- La probabilité d'échec d'un appel en relève horizontale WLAN :

$$P_f^w = (1 - P_{cov}) \sum_{i+j=c_w} P_{i,j,w} + P_{cov} \quad (4.2)$$

Où P_{cov} est la probabilité de rupture de la couverture WLAN ;

- La probabilité d'échec d'un appel en relève verticale vers le WLAN : $P_{fv}^w = P_b^c$ pour le schéma d'intégration faible (a), $P_{fv}^w(x)$ pour le schéma d'intégration moins faible (b) où $c_w - g_w < x < c_w$ est le niveau de garde pour les relèves verticales, et $P_{fv}^w = P_f^c$ pour le schéma d'intégration forte (c) ;

- La probabilité de coupure d'un appel dans le réseau global WLAN séparé :

$$P_d^w = \frac{P_h^w P_f^w}{1 - P_h^w (1 - P_f^w)} \quad (4.3)$$

Des expressions similaires peuvent facilement être déduites pour le cas d'une cellule 3G en échangeant judicieusement les indices w et c dans les expressions précédentes.

En considérant la continuité des appels grâce à l'exécution de relèves verticales suite aux échecs des relèves horizontales, nous développons des expressions plus adaptées pour la probabilité de coupure d'appel dans le réseau 3G/WLAN intégré en fonction du schéma d'intégration.

- La probabilité de coupure d'appel dans un réseau 3G/WLAN intégré selon le schéma (a) d'intégration faible :

$$P_{d,a}^{w-c} = P_d^w P_d^c \left(1 + \left(\frac{1}{P_h^c} - 1\right) \frac{P_b^c}{P_f^c}\right) \quad (4.4)$$

- La probabilité de coupure d'appel dans un réseau 3G/WLAN intégré selon le schéma (b) d'intégration moins forte :

$$P_{d,b}^{w-c}(x) = P_d^w P_d^c \left(1 + \left(\frac{1}{P_h^c} - 1\right) \frac{P_{fv}^c(x)}{P_f^c}\right) \quad (4.5)$$

- La probabilité de coupure d'appel dans un réseau 3G/WLAN intégré selon le schéma (c) d'intégration forte :

$$P_{d,c}^{w-c} = P_{d,b}^{w-c}(c_c) \quad (4.6)$$

$$= P_d^w \frac{P_d^c}{P_h^c} \quad (4.7)$$

4.1.5 Estimations des taux de relève

En général, on utilise des valeurs pré-définies pour les taux de relève qu'on injecte comme paramètres d'entrées à l'algorithme itératif de Gauss-Seidel permettant l'estimation des probabilités d'état à l'équilibre. Toutefois, dans le but d'avoir beaucoup plus de précision dans l'analyse des performances, nous estimons les taux de relève en appliquant les équations du point fixe issues des équations de conservation de flot qui peuvent être

4.2 Contrôle d'admission optimal de voix dans un réseau 3G/WLAN intégré

À partir des expressions de probabilités de blocage présentées précédemment, nous remarquons que les probabilités de blocage dépendent des fonctions de probabilité d'acceptation $\beta_k(\cdot)$ et $\beta'_k(\cdot)$. Par conséquent, nous avons besoin de trouver les paramètres d'admission optimaux (capacités de garde g_k et $g'_k(\cdot)$) qui permettent de donner la performance optimale du réseau 3G/WLAN intégré en terme de QoS au niveau appel. À cet effet, nous redéfinissons le problème du CAC optimal pour le cas d'un 3G/WLAN intégré où les nouveaux appels et les appels en relève peuvent effectuer des relèves verticales entre les deux réseaux 3G et WLAN de façon contrôlée qui dépend du schéma d'intégration choisi.

Nous supposons que pour un schéma d'intégration fort, la SSR "réseau WLAN en premier" présentée et analysée par Song *et al.* (2007) est beaucoup plus adaptée puisqu'elle donne préférence au réseau WLAN pour son faible coût au lieu du réseau 3G souvent surchargé. Alors que pour un schéma d'intégration faible, la SSR de débordement présentée au chapitre précédent est beaucoup plus adaptée puisqu'elle permet à chaque opérateur 3G ou WLAN de minimiser les frais d'itinérance et de maximiser l'utilisation de son propre réseau avant de chercher à consommer les ressources d'un autre réseau externe qui servira dans ce cas d'un réseau de derniers recours pour garantir la non coupure des appels.

4.2.1 Paramètres du problème d'optimisation

Il est bien connu que l'augmentation de la capacité de garde g dans une cellule donnée augmente la probabilité de blocage des nouveaux appels P_b due au fait que ces derniers n'auront droit qu'à une fraction plus faible de la capacité totale (le seuil de garde $c - g$ diminue lorsque g augmente). Et, par conséquent, le trafic des nouveaux appels acceptés après un blocage plus élevé se trouve diminué et les appels en relève auront droit à plus de bande passante qui leur soit exclusivement réservée, ce qui diminue la probabilité d'échec

de relève P_f . D'un autre côté, la diminution de la bande de garde aura l'effet inverse sur les probabilités de blocage et d'échec de relève. C'est-à-dire quand g diminue, P_b diminue et P_f augmente. Pour avoir un bon taux d'utilisation de la bande passante sans fil, il est souvent conseillé de diminuer la probabilité de blocage des nouveaux appels en accordant très peu d'échecs de relèves. Dans la majorité des travaux de recherche sur le contrôle d'admission dans les réseaux cellulaires homogènes dont les travaux de Ghaderi et Boutaba (2003) font une bonne référence, on ramène souvent le problème de recherche de la capacité de garde à un problème d'optimisation. Le problème d'optimisation du contrôle d'admission le plus populaire est celui dont l'objectif est de minimiser la probabilité de blocage des nouveaux appels sans dépasser un certain seuil de probabilité d'échec de relève qui constitue une contrainte de QoS fixée comme paramètre de planification du réseau mobile. Ce problème d'optimisation du contrôle d'admission est souvent appelé MinBlock et a été analysé par Ramjee *et al.* (1997). La formulation mathématique de ce problème MinBlock est donnée dans l'équation 4.12).

$$P_b^* = \min_{(g)} \{P_b(g)\} / P_f \leq P_f^{max} \quad (4.12)$$

Pour offrir la même QoS aux usagers mobiles de manière équitable indépendamment de leur taux de mobilité, il est possible de fixer une contrainte de QoS sur une probabilité de coupure d'appel ne dépassant pas un certain seuil maximal P_d^{max} au lieu d'une probabilité d'échec de relève ne dépassant pas le seuil maximal P_f^{max} . En effet, en fixant une contrainte sur un P_f^{max} par cellule individuelle et en évaluant l'expression de la probabilité de coupure d'appel dans tout le réseau $P_d = (P_h^h P_f) / (1 - P_h^h (1 - P_f))$, les usagers qui sont très mobiles, c'est-à-dire ceux qui ont une probabilité de relève assez élevée, soit P_h^h assez élevée, risquent plus d'avoir leurs appels coupés que ceux qui sont beaucoup moins mobiles sur des couvertures radio composées de cellules de petites tailles.

4.2.2 Formulation du contrôle d'admission optimal de voix dans un WLAN/3G intégré

Nous remarquons que pour le service de voix, la plupart des opérateurs mobiles essayent souvent de se distinguer de leur compétiteurs en garantissant le moins d'appels coupés ou interrompus sans pour autant perdre en efficacité d'utilisation de la capacité en maximisant l'acceptation des nouveaux appels. Par conséquent, puisque pour une même capacité, la minimisation de la probabilité de coupure d'appel induit une augmentation inévitable de la probabilité de blocage des nouveaux appels et vice-versa, le contrôle d'admission doit minimiser la probabilité de blocage des nouveaux appels tout en satisfaisant une contrainte dure sur un faible taux de coupure d'appel dans le réseau WLAN/3G intégré ne dépassant pas un certain seuil maximal $P_d^{w-c,max}$ qui est souvent assez faible. Pour cela, la probabilité de coupure d'appel P_d^{w-c} est redéfinie à la sous section 4.1.4 pour tenir compte des relèves verticales dans chaque schéma d'intégration entre réseau WLAN et réseau 3G.

L'objectif du contrôle d'admission du réseau WLAN, respectivement du réseau 3G, est de minimiser le taux de blocage des nouveaux appels P_b^w , respectivement P_b^c , sujet à un taux de coupure d'appel ne dépassant pas un seuil maximal $P_d^{w-c,max}$, respectivement $P_d^{c,max}$, étant donné que nous négligeons les relèves verticales non obligatoires dans l'expression de la probabilité de coupure d'appel développée au chapitre précédent.

Notons que nous utilisons des capacités de garde randomisées puisque d'après Ramjee *et al.* (1997), la solution optimale des problèmes de type MinBlock s'implémente en utilisant l'algorithme de la capacité de garde fractionnelle limitée (CGFL). En outre, notre cadre générique de modélisation d'un RMHPG développé au chapitre précédent considère une politique d'admission basée sur la capacité de garde fractionnelle (CGF) de façon générale. Ainsi il nous est facile de spécialiser la CGF en une CGFL non entière qui permettra

dans ce cas d'avoir des paramètres de QoS au niveau appel qui sont beaucoup plus précis que ceux données par une CG entière et par suite une meilleure efficacité dans l'utilisation des ressources de bande passante sans fil. La partie fractionnelle de la CGFL sert de probabilité d'acceptation des nouveaux appels au cas où le taux d'occupation de la cellule atteint la partie entière de cette CGFL.

Donc, pour le réseau cellulaire 3G, le problème MinBlockC du contrôle d'admission reste généralement le même :

$$P_b^{c*} = \min_{0 \leq g_c \in \mathfrak{R} \leq c_c} \{P_b^c(g_c)\} / P_d^c \leq P_d^{c,max} \quad (4.13)$$

Alors que pour le réseau WLAN/3G intégré, le problème MinBlockWC du contrôle d'admission au niveau WLAN est redéfini comme suit :

$$\begin{aligned} & \min_{(g_w, g_c) \in [0, c_w] \times [0, c_c]} P_b^w \\ & \text{sujet à : } P_d^{w-c}(g_w, g_c) \leq P_d^{w-c,max} \end{aligned} \quad (4.14)$$

Notons que $P_d^{w-c}(g_w, g_c)$ donnée à la sous section 4.1.4 dépend du schéma d'intégration choisi.

4.2.3 Méthode de recherche de la capacité de garde optimale

Nous proposons un algorithme simple et rapide pour calculer la CGFL pour les problèmes d'optimisation MinBlockC et MinBlockWC. En effet, des tests préliminaires ont montré qu'il suffit d'une dizaine d'itérations sur quelques opérations simples pour converger, et cela pour un problème de taille réelle. Cet algorithme itératif illustré à la Figure 4.4 permet de voir l'influence de l'intégration WLAN/3G sur les performances du blocage du contrôle d'admission optimal de voix dans les réseaux mobiles WLAN et 3G dans le but

d'évaluer leur éventuelle intégration selon le schéma (a), (b) ou (c).

Une brève description du fonctionnement de cet algorithme est donnée dans ce qui suit. Initialement, c'est-à-dire juste avant d'avoir l'intégration des réseaux 3G et WLAN, dans le problème MinBlockWC, nous avons $P_d^{w-c} = P_d^w$. Avec ce paramètre initial, nous lançons notre algorithme d'optimisation MinB illustré à la Figure 4.4 en réajustant les CGFL des deux niveaux 3G et WLAN séparément. Ensuite, en fonction du schéma d'intégration, nous utilisons la nouvelle expression de P_d^{w-c} pour lancer l'algorithme de réajustement de la CGFL g_w au niveau WLAN pour optimiser MinBlockWC. Ensuite, comme l'intégration augmente le trafic des nouveaux appels au niveau 3G provenant du débordement du niveau WLAN, nous exécutons l'algorithme présenté à la partie de droite de la Figure 4.4 qui permet de réajuster la CGFL g_c au niveau 3G pour optimiser MinBlockC et nous observons ainsi les nouveaux taux de blocage au niveau 3G. Ceci a pour effet de modifier l'état de MinBlockWC et par conséquent nous devons relancer l'algorithme de réajustement de la CGFL g_w au niveau WLAN présenté à la partie de gauche de la Figure 4.4 pour re-optimiser encore MinBlockWC et ainsi de suite jusqu'à la convergence des fonctions objectives c'est-à-dire des deux probabilités de blocage des nouveaux appels au niveau 3G P_b^{c*} et au niveau WLAN P_b^{w*} avec une certaine précision ε .

Pour avoir de bonnes performances, si un P_b^{c*} satisfaisant le problème dépasse un certain seuil de QdS, une re-planification de la bande passante sans fil doit être considérée par l'opérateur 3G en cherchant par exemple à ajuster la capacité minimale qu'il doit fournir pour en même temps faire diminuer P_b^{c*} sous le seuil de QdS et garantir $P_d^{c,max}$. Cette re-planification peut se faire en-ligne dans les réseaux cellulaire multiservices 3G puisque la fraction de la capacité réservée pour les appels d'une classe de service donnée peut être augmentée au détriment de la fraction de la capacité réservée pour les appels d'une autre classe de service (en commençant généralement par les classes les moins prioritaires telles que la classe de données "best effort"). Toutefois, pour une solution à long terme une re-

planification des canaux et des stations de base au niveau réseau radio doit se faire pour augmenter la capacité du réseau 3G. Une approche de re-planification similaire peut se faire également pour le réseau WLAN.

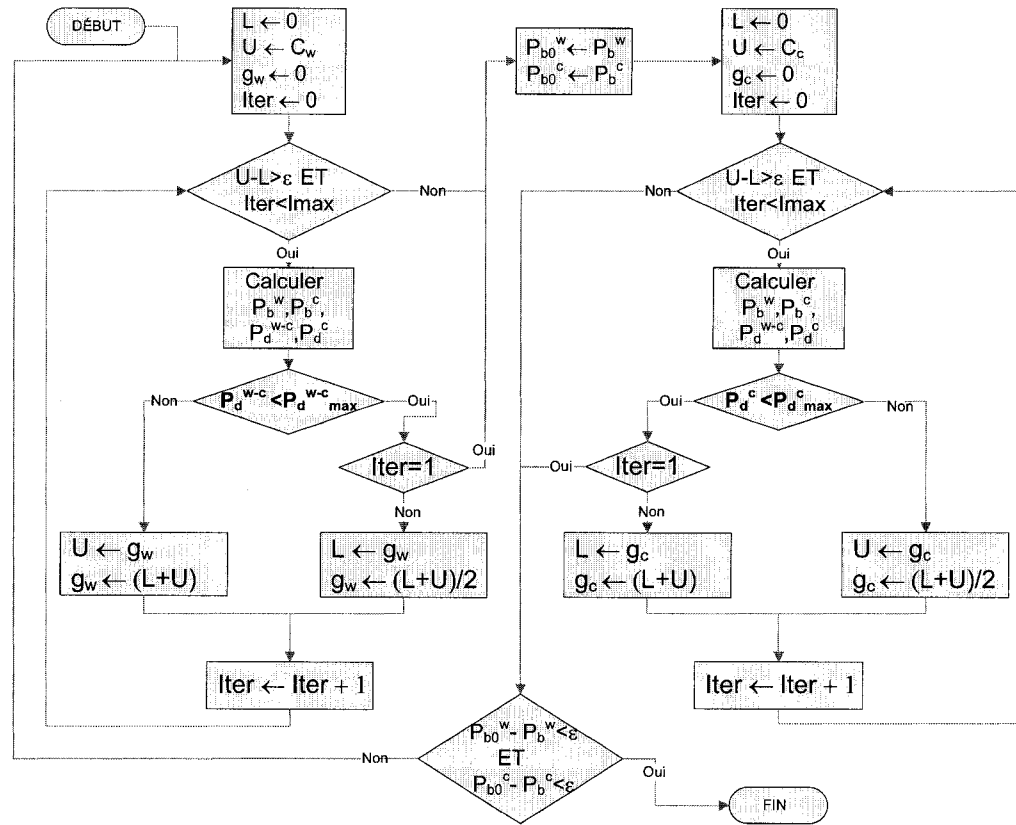


FIGURE 4.4 Algorithme de recherche des paramètres du CAC optimal pour le 3G/WLAN

4.3 Résultats analytiques, validations et interprétations

Dans cette section, nous présentons et validons les résultats numériques données par nos modèles analytiques et notre algorithme de recherche de paramètres du CAC optimal pour un réseau 3G/WLAN selon différents schémas. De plus, nous interprétons ces résultats de performance représentant les métriques de QoS au niveau appel.

4.3.1 Paramètres de configuration du système 3G/WLAN

La Tableau 4.1 présente les valeurs utilisées des paramètres les plus importants du système 3G/WLAN faisant l'objet de l'étude de performance.

TABLEAU 4.1 Paramètres du système 3G/WLAN

Paramètre	Valeur
$P_d^{c,max} (P_d^{w-c,max})$	1%
c_c	13
c_w	15
$(\mu)^{-1}$	4 mn
$(\eta_c)^{-1}$	2 mn
$(\eta_w)^{-1}$	20 mn
P^{c-w}	5%
P_{cov}	20%
ε	0.0001

4.3.2 Validation du modèle analytique

Dans le but de valider notre analyse des probabilités de blocage, nous avons développé notre propre simulateur à événements discrets en langage C++. Nous considérons une région de couverture 3G ubiquitaire divisée en plusieurs cellules hexagonales, chaque cellule ayant 6 cellules voisines. Dans le but de couvrir le plus possible de cellules et éliminer l'effet de bord qui ne doit pas être présent dans une couverture ubiquitaire, nous utilisons

le modèle très connu de "wrap around" qui dans notre cas inclut $m_w m_c = 49$ cellules. Dans ce modèle, le trafic de relève qui sort d'un bord de la région de couverture des 49 cellules va rentrer encore dans la même région de l'autre bord. Nous supposons une région de couverture WLAN limitée qui recouvre chaque cellule 3G. Plus exactement, $m_w = 7$ cellules WLAN recouvrent une même cellule 3G avec une probabilité de perte de couverture WLAN notée P_{cov} . Dans chaque cellule (3G ou WLAN), les arrivées des nouveaux appels sont générées conformément à des processus de Poissons avec leur taux respectifs. Par contre, les arrivées des appels en relève sont déclenchées par le simulateur au moment de l'écoulement de leur durée de service (TMC). En effet, ces relèves ne sont pas générées par les processus de Poissons habituels puisque ces derniers ne sont pas assez précis pour modéliser le trafic bloquant de relève. Nos résultats de simulation sont des moyennes de valeurs stochastiques établies sur 5 séries de tirages aléatoires selon les distributions utilisées. Notons qu'il y a deux avantages à ces résultats de simulation. Premièrement, puisqu'il n'existe dans la littérature aucun modèle analytique approprié caractérisant le trafic de relève, la simulation reste l'unique moyen d'estimer ce trafic avec une bonne précision. Deuxièmement, malgré le fait que les simulations consomment un nombre excessif de cycles de calcul, c'est un moyen assez puissant pour vérifier si toutes les probabilités de blocage et de coupure d'appels estimées en utilisant nos modèles analytiques restent valides pour un système réel correctement simulé.

À la Figure 4.5, nous notons que les probabilités de blocage des nouveaux appels et des probabilités de coupure d'appel en cours au niveau 3G, qui sont estimées en utilisant le modèle analytique que nous avons proposé, sont presque égales aux mêmes probabilités calculées par simulations. De même, à la Figure 4.5 nous observons que les résultats d'analyse pour le niveau WLAN sont conformes à ceux des simulations. Chaque point dans les résultats de simulation est une moyenne stochastique sur un nombre suffisant d'échantillons de telle sorte que l'intervalle de confiance a une largeur de 0.002 avec un niveau de

confiance de 95%. En outre, à la Figure 4.5 nous remarquons que l'algorithme de recherche des paramètres optimaux du contrôle d'admission ajuste bien la CGFL optimale d'une cellule 3G g_{minB}^c (respectivement la CGFL optimale d'une cellule WLAN g_{minB}^w) en fonction du taux d'arrivée des nouveaux appels, de telle sorte qu'il minimise le taux de blocage des nouveaux appels tout en satisfaisant une contrainte de QoS stricte sur un taux de coupure d'appel ne dépassant pas le 1%. Notons qu'à cause de la faible intensité du trafic au niveau WLAN comparativement à celui au niveau 3G, la CGFL commence à augmenter seulement à un taux d'arrivée de nouveaux appels plus élevé de 2.75 appels/mn pour le WLAN comparativement à 1.75 appels/mn pour le 3G.

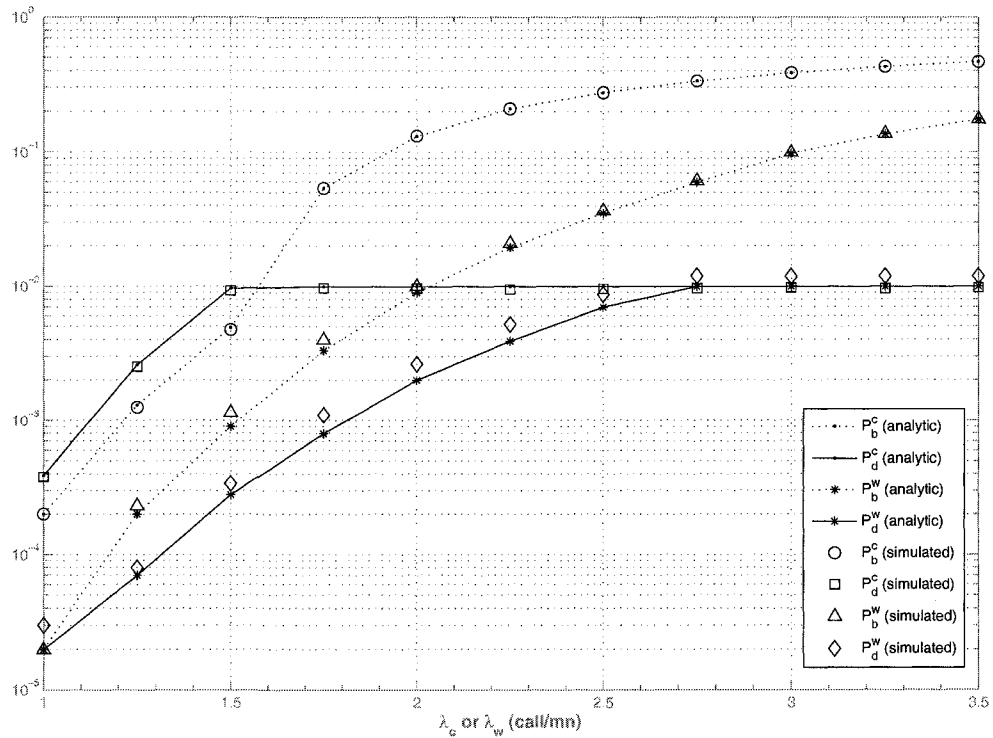


FIGURE 4.5 Validation des probabilités de blocage sous le CAC optimal

4.3.3 Résultats de performance et interprétations

Rappelons que dans un inter-fonctionnement 3G/WLAN selon un schéma d'intégration faible, les appels en débordement en relève verticale sont traités comme de nouveaux appels. Si le schéma d'intégration forte est utilisé, les appels en débordement en relève verticale sont traités comme des appels en relève horizontale. Lorsqu'aucune intégration n'existe entre les réseaux 3G et WLAN, il n'y a ni appels en relève verticale ni débordement de nouveaux appels d'un réseau à un autre.

Les résultats présentés à la Figure 4.6 montrent que le schéma d'intégration faible dans un inter-fonctionnement 3G/WLAN fournit les probabilités de blocage de nouveaux appels les plus faibles pour les deux réseaux 3G et WLAN. En effet, contrairement à un schéma d'intégration forte où les appels en relève verticale vers le haut, c'est-à-dire du WLAN vers le 3G, ont accès à toute la capacité des appels de voix du réseau 3G, l'intégration faible donne à ces appels en relève verticale seulement un accès limité à la capacité totale ce qui réduit le trafic en débordement et par conséquent laisse plus de capacité pour les nouveaux appels au niveau 3G. Dans ces résultats, nous avons considéré seulement une très petite fraction $P^{c-w} = 0.05$ d'appels en relèves verticales vers le bas, c'est-à-dire du 3G vers le WLAN. Ces appels en relève verticale volontaire peuvent être déclenchés pour libérer le trafic d'une cellule 3G surchargée ou pour bénéficier du faible coût du WLAN. En effet, cette fraction est très faible puisque ce ne sont pas tous les usagers 3G qui sont équipés d'une station mobile multi-mode et qu'en moyenne la couverture WLAN est relativement très faible par rapport à la couverture d'une cellule 3G. Par conséquent, dans les résultats présentés, l'effet attendu du trafic d'appels en relève verticale volontaire dans la diminution de la probabilité de blocage des nouveaux appels au niveau 3G est négligeable. Cet effet est compensé par un trafic d'appels en relève verticale obligatoire qui fait augmenter cette même probabilité de blocage beaucoup plus qu'un trafic d'appels en relève

verticale volontaire ne la fait diminuer.

Les résultats de la Figure 4.7 montrent qu'un schéma d'intégration forte ou un schéma d'intégration faible sous un trafic offert assez faible fournit un moyen intéressant pour satisfaire la contrainte de QoS sur une probabilité de coupure d'appel ne dépassant pas la valeur seuil fixée $P_d^{w-c,max} = 10^{-2}$. Ceci est dû à la probabilité de rupture de la couverture WLAN, un réseau WLAN séparé ou non intégré au réseau 3G, ne peut à lui seul satisfaire cette contrainte critique de QoS. De plus, un schéma d'intégration faible qui fournit des probabilités de blocage de nouveaux appels beaucoup plus faibles que d'autres schémas d'intégrations, satisfait la contrainte de QoS du WLAN seulement pour un taux d'arrivée de nouveaux appels ne dépassant pas les 2 appels/mn comme indiqué à la Figure 4.7. Par conséquent, dans le but d'accommoder une charge d'appel offerte dépassant les 2 appels/mn tout en satisfaisant la contrainte de QoS, l'algorithme MinB proposé est incapable de fournir une meilleure solution puisqu'une CGFL nulle est atteinte pour le WLAN et qu'il est impossible de faire mieux. Dans ce cas, seulement une re-planification du réseau WLAN permettra de satisfaire la contrainte de QoS en ajoutant par exemple des points d'accès WLAN afin d'augmenter la couverture et diminuer par conséquent la probabilité P_{cov} de rupture de couverture WLAN.

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons analysé les performances du contrôle d'admission d'appels de voix dans un réseau 3G/WLAN en fonction du schéma d'intégration choisi. Cette analyse, validée par des simulations à événements discrets, permet à des concepteurs de réseaux de prédire les performances des différents réseaux en cas d'intégration et de décider s'il faut re-planifier le réseau dans le but de satisfaire les contraintes de QoS au niveau appel. En outre, et plus particulièrement, nous avons montré qu'un schéma d'intégration

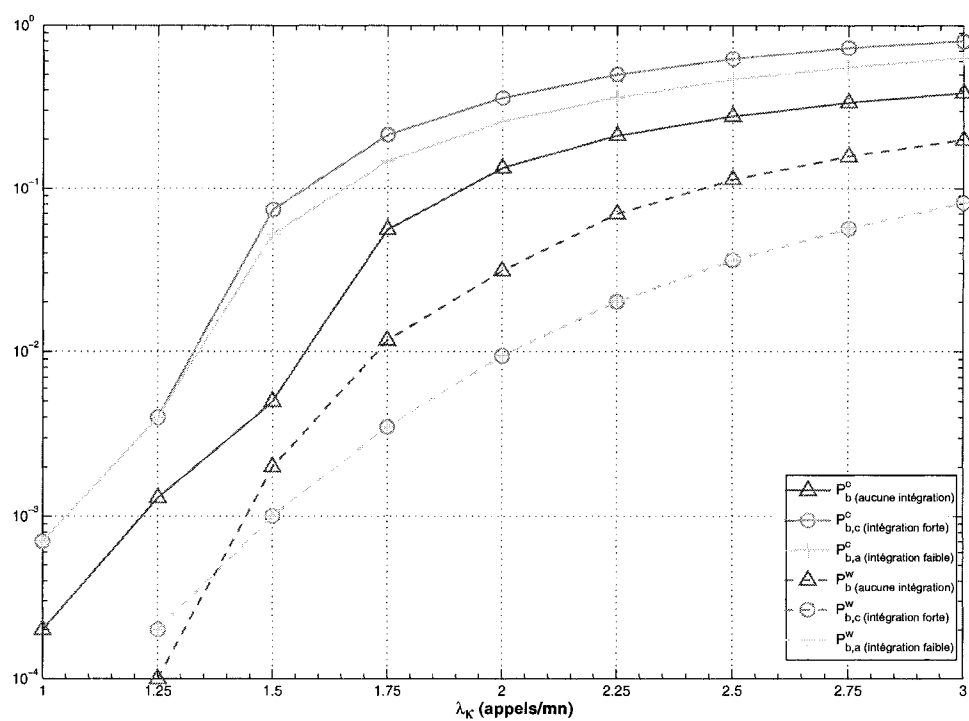


FIGURE 4.6 Probabilité de blocage en fonction du schéma d'intégration

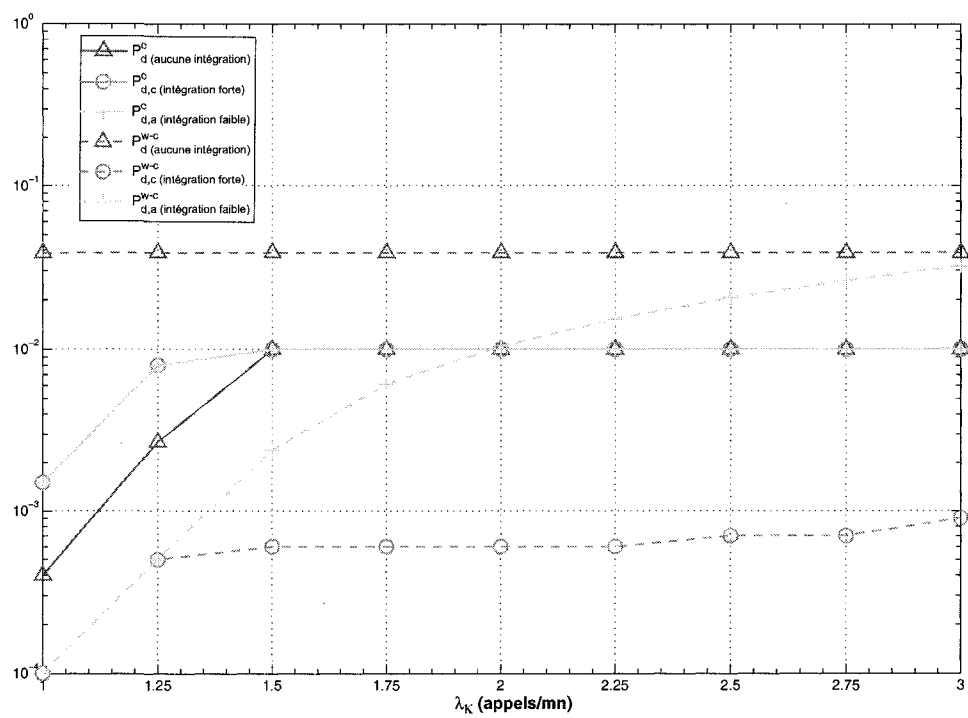


FIGURE 4.7 Probabilité de coupure en fonction du schéma d'intégration

faible, permettant une flexibilité d'intégration entre 3G et WLAN, offre un moyen pour limiter l'augmentation de la probabilité de blocage du réseau 3G comparativement à un schéma d'intégration fort. Toutefois, pour des charges élevées, une augmentation de la couverture WLAN est à considérer dans le but de toujours satisfaire la contrainte de QoS sur une probabilité de coupure d'appels très faible. D'un autre côté, ce schéma d'intégration faible, bien que très pratique à adopter, soulève le problème de la dégradation de la QoS au niveau paquet pour les appels de voix qui est causé souvent par la latence assez élevée des relèves verticales dans ce schéma d'intégration particulier. Ainsi, dans le chapitre suivant, nous modélisons un mécanisme de soft handoff qui permet de contrer ce problème et nous étudions l'impact de ce mécanisme sur les performances du contrôle d'admission optimal.

CHAPITRE 5

IMPACT DU SOFT HANDOFF SUR LES PERFORMANCES DU CAC OPTIMAL DANS UNE INTÉGRATION FAIBLE 3G/WLAN

Considérant les bénéfices de la flexibilité de l'implémentation et le déploiement indépendant des réseaux 3G et WLAN par différents opérateurs mobiles indépendants, l'architecture d'intégration de ces réseaux selon un faible couplage est devenue de plus en plus populaire. Toutefois, il est bien connu qu'une intégration faible engendre une latence très élevée surtout lors des relèves demandant des mises à jours de la localisation et/ou de l'adresse IP lors des relèves verticales se basant sur les protocoles HMIPv6 (SOLIMAN *et al.*, 2005) ou mSCTP (Koh *et al.*, 2004). Par conséquent, un mécanisme de "soft handoff" est requis dans le but de garantir la QoS au niveau paquet pour les appels de voix lors des périodes de coupures du processus de relèvement. Généralement, le soft handoff fournit une connectivité et une consommation de ressources sur une station de base et un point d'accès simultanément, et cela durant toute la période du processus de relèvement verticale pouvant impliquer association, authentification, contrôle d'admission radio et réseau, mise à jour de localisation etc. Ainsi, avec l'introduction de ce mécanisme de soft handoff vertical, les performances des réseaux 3G et WLAN, même sous un contrôle d'admission optimal, peuvent être affectées comme il a été montré par Ben Ali et Pierre (2008). Et dans ce cas, une optimisation du soft handoff pourrait être nécessaire afin de maintenir l'utilisation efficace de la bande passante sans fil tout en garantissant la QoS.

Dans ce chapitre, nous commencerons par adapter les modèles de mobilité que nous avons proposé dans les chapitres précédents pour tenir compte de la région du soft handoff. Ensuite, nous présenterons des algorithmes de soft handoff vertical plus ou moins efficaces

et nous développerons l'analyse des performances du système 3G/WLAN en fonction de l'algorithme du soft handoff utilisé. Enfin, nous présenterons les résultats de performance et leurs interprétations. Dans une quatrième et dernière Section nous conclurons le chapitre.

5.1 Modélisation du système

Dans cette section nous proposons un nouveau modèle de mobilité multi-régions dans une cellule 3G tenant compte de la région du soft handoff. Ensuite, nous développons le temps de maintien du canal et les probabilités du soft handoff. Ces expressions seront utilisées par la suite, en utilisant les modèles d'occupation de la capacité et du contrôle d'admission optimal que nous avons proposés dans les chapitres précédents, dans le but de calculer les différentes probabilités de blocage relatives à ce nouveau système.

5.1.1 Modèle de mobilité multi-régions

Le but étant d'étudier l'impact du soft handoff sur les performances du contrôle d'admission optimal, nous développons un nouveau modèle de mobilité dans une couverture 3G/WLAN en tenant compte de la région du soft handoff. Particulièrement, nous proposons un modèle de mobilité dépendant de la localisation dans une cellule 3G qui est décomposée en trois types de régions en fonction du nombre de couvertures en superposition, c'est à dire couverture simple ou double, et du mode d'occupation des ressources, c'est à dire en mode uni-casting ou bi-casting. Ces types de régions sont illustrés à la Figure 5.1 : plusieurs régions cœur du WLAN, ainsi que les régions frontières correspondantes conçues pour le soft handoff et finalement une région à simple couverture 3G. Ces régions sont définies comme suit :

- Une région de cœur WLAN, notée RW, est caractérisée par une double couverture des deux réseaux WLAN et 3G. Toutefois, seulement les ressources d'une seule couverture

sont utilisées à la fois par une station mobile multi-mode. Nous supposons une stratégie de sélection du réseau qui accorde une préférence à l'allocation des ressources du réseau WLAN vu son faible coût d'utilisation au lieu des ressources limitées du réseau 3G qui se trouve souvent surchargé par un nombre important d'utilisateurs. Étant donné la faible mobilité dans les environnements WLAN et l'effet Pareto du temps de résidence constaté par Thajchayapong et Peha (2006), nous utiliserons une distribution hyper-exponentielle avec un taux moyen η_w et un paramètre de variabilité α_w pour modéliser le temps de résidence dans la région RW illustré à la Figure 5.2. La fonction de densité de probabilité du temps de résidence dans cette région est exprimée comme suit :

$$f_{RW}(t) = \frac{\alpha_w}{1 + \alpha_w} \alpha_w \eta_w e^{-\alpha_w \eta_w t} + \frac{1}{1 + \alpha_w} \frac{\eta_w}{\alpha_w} e^{-\frac{\eta_w}{\alpha_w} t} \quad (5.1)$$

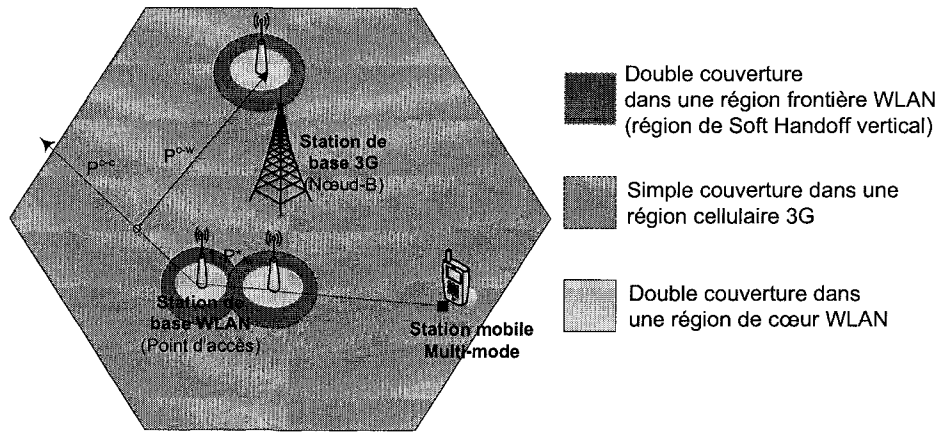


FIGURE 5.1 Les différentes régions dans une cellule 3G

- Une *région frontière WLAN* pour le soft handoff, notée RWC (resp. RCW), est caractérisée par une double couverture des deux réseaux WLAN et 3G et dans laquelle les ressources des deux réseaux sont allouées en même temps par la station mobile multi-

mode quittant (resp. entrant) la région cœur WLAN. Particulièrement, cela définit la région de soft handoff vertical (VHO) dans laquelle la station mobile multi-mode maintient simultanément deux connexions en mode bi-casting de l'appel de voix sur un point d'accès WLAN et une station de base 3G simultanément. Ce bi-casting dans la région frontière garantit la QoS au niveau paquet pour les appels de voix durant la période de coupure de la relève verticale. La QoS au niveau appel peut être significativement améliorée en évitant le rejet d'appels dû aux échecs des relèves horizontales WLAN en déclenchant des relèves verticales vers le haut, c'est à dire vers la cellule 3G en superposition. En fonction de l'architecture de gestion de mobilité déployée par les opérateurs 3G et WLAN, le soft handoff peut faire intervenir les mécanismes de bi-casting de HMIPv6 ou les mécanismes de domiciliations multiples de mSCTP. Puisque nous sommes intéressés à la partie de la relève qui implique une duplication de l'utilisation des ressources définissant le soft handoff, le délai de la relève représente le délai du processus de signalisation sans fil se produisant immédiatement après l'allocation du canal sur le prochain AP/BS ajouté au délai de la configuration de l'adresse IP et de la mise à jour de la localisation auprès du noeud correspondant (CN). Nous modélisons le délai de relève par la somme d'une constante et d'une variable aléatoire qui dépend du délai d'attente de la configuration éventuelle de l'adresse IP, de la localisation du CN et de la latence de l'Internet. Comme une distribution constante ne garde pas la propriété Markovienne (Fang, 2005) requise pour notre analyse de files d'attente, nous l'approximons en utilisant la distribution d'Erlang avec un grand nombre r de phases. Par suite, nous modélisons le temps de résidence total dans la région du soft handoff par une somme de r distributions d'Erlang de taux K_w pour la relève verticale vers le haut (resp. K_c pour la relève verticale vers le bas) et d'une distribution exponentielle d'un taux moyen σ_w (resp. σ_c). r_w/K_w représente la partie constante du délai de la relève et $1/\sigma_w$ représente le paramètre moyen de sa partie variable. Dans la section suivante, nous distinguons entre deux algorithmes de soft handoff : le premier est optimal et dimensionné pour la juste

valeur de la latence de la procédure de relève avec un paramètre $1/\sigma_w^*$. Le second est dimensionné pour une valeur plus élevée $1/\sigma_w$ pour n'importe quel autre algorithme de soft handoff qui n'est pas optimal en consommation de ressources. Ainsi, la fonction de densité de probabilité du temps de résidence dans la région RWC s'exprime comme suit :

$$f_{RWC}(t) = (t - K_w)e^{-\sigma_w(t-K_w)} \quad (5.2)$$

- Une région de cœur 3G, notée RC, est caractérisée par une seule couverture 3G. Le temps de résidence dans cette région est modélisé, comme dans RW, en utilisant une distribution hyper-exponentielle avec un taux moyen η_c et un paramètre de variabilité α_c . Nous utilisons cette distribution afin de contourner le problème de la non validité de l'hypothèse d'un TRC exponentiel et afin de capturer la variabilité élevée du TRC dans les systèmes cellulaires de nouvelle génération, comme il a été remarqué par Zeng et Chlamtac (2003). Notons que la fonction de densité de probabilité du temps de résidence dans RC est similaire à celle de RW.

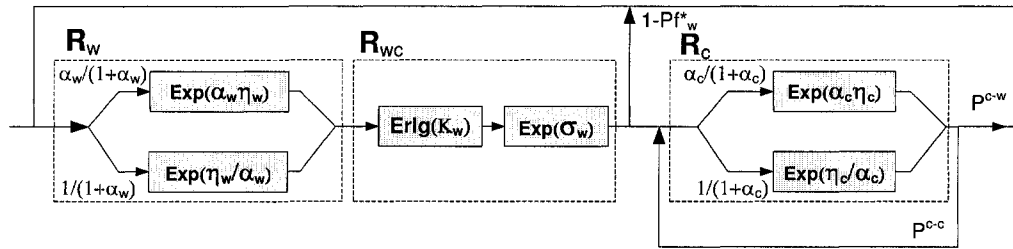


FIGURE 5.2 Modèle de mobilité multi-régions dans une cellule 3G

5.1.2 Expression du temps de maintien de canal (TMC)

Notons λ_w (resp. λ_c) le taux d'arrivée des nouveaux appels à une cellule WLAN (resp. une cellule 3G) et notons $1/\mu$ le temps de maintien d'appel, c'est à dire sa durée moyenne. Il est communément supposé que les nouveaux appels arrivent selon un processus de Poisson et que le temps de maintien d'appel suit une distribution exponentielle. Pour des raisons de simplicité, notons TRW (resp. TRC) la variable aléatoire représentant le temps de résidence dans une cellule WLAN (resp. le temps de résidence dans une cellule 3G). De plus, notons RW, RWC et RC les variables aléatoires représentant les temps de résidence dans leurs régions respectives. Puisque TRW est la somme de deux variables aléatoires continues indépendantes et non négatives RW et RWC, c'est à dire $TRW = RW + RWC$, sa fonction de densité de probabilité est le produit de convolution des fonctions de densité de probabilité de RW et de celle de RWC :

$$f_{TRW}(t) = (f_{RW} \otimes f_{RWC})(t) = \int_0^t f_{RW}(x) f_{RWC}(t-x) dx \quad (5.3)$$

La transformée de Laplace de la fonction de densité de probabilité de TRW est beaucoup plus facile à déduire puisqu'elle est égale au produit des transformées de Laplace des fonctions de densité de probabilité de RW et de celle de RWC. Donc, en appliquant la transformée de Laplace aux équations 5.1 et 5.2, nous obtenons :

$$F_{RW}(s) = \frac{(\alpha_w^2 - \alpha_w + 1)s + \alpha_w \eta_w}{(\alpha_w s + \eta_w)(s + \alpha_w \eta_w)} \quad (5.4)$$

$$F_{RWC}(s) = \left(\frac{K_w}{K_w + s} \right)^r \left(\frac{\sigma_w}{\sigma_w + s} \right) \quad (5.5)$$

$$\begin{aligned} F_{TRW=RW+RWC}(s) &= F_{RW}(s) F_{RWC}(s) \\ &= \frac{(\alpha_w^2 - \alpha_w + 1)s + \alpha_w \eta_w}{(\alpha_w s + \eta_w)(s + \alpha_w \eta_w)} \left(\frac{K_w}{K_w + s} \right)^r \left(\frac{\sigma_w}{\sigma_w + s} \right) \end{aligned} \quad (5.6)$$

Nous supposons une allocation de bande passante WLAN basée sur le mode d'accès centralisé PCF pour les appels de voix tel qu'il a été décrit au chapitre 3. Nous assumons aussi un nombre maximal assez conservateur d'appels de voix qui est analytiquement pré-déterminé et qui reste constant durant la période d'évaluation. Nous utilisons le théorème 2 de Fang et Lin (1998) pour exprimer la transformée de Laplace de la fonction de densité de probabilité du TMC des nouveaux appels ainsi que la transformée de Laplace de la fonction de densité de probabilité du TMC des appels en relève. Ceci nous donne :

$$F_{TMC}^{new,w}(s) = \frac{\mu}{s+\mu} + \frac{\eta_{TRW}s^2}{s+\mu} (1 - F_{TRW}(s+\mu)) \quad (5.7)$$

$$F_{TMC}^{ho,w}(s) = \frac{\mu}{s+\mu} + \frac{s}{s+\mu} F_{TRW}(s+\mu) \quad (5.8)$$

En désignant par $M_{TRW}(\cdot)$ la fonction génératrice du moment de la fonction de densité de probabilité du TRW, nous exprimons η_{TRW} , c'est-à-dire le taux de résidence dans une cellule WLAN, comme suit :

$$\eta_{TRW} = \frac{1}{E(TRW)} = \frac{1}{M_{TRW}^{(1)}(0)} = \frac{-1}{F_{TRW}^{(1)}(0)} = \frac{\sigma_w \eta_w K_w}{K_w \sigma_w + r \eta_w \sigma_w + K_w \eta_w} \quad (5.9)$$

En effet, il est connu que $\frac{dM_{TRW}(t)}{dt}|_{t=0} = \frac{dF_{TRW}(-t)}{dt}|_{t=0} = \frac{-1}{F_{TRW}^{(1)}(0)}$ pour une variable aléatoire continue et non négative TRW. En utilisant les équations 5.7 et 5.8, nous développons le TMC moyen, c'est-à-dire le temps d'occupation moyen d'un canal WLAN, pour les deux types d'appels comme suit :

$$\frac{1}{\mu_w^{new}} = -(F_{TMC}^{new,w})'(0) = \frac{\mu - \frac{\sigma_w \eta_w K_w}{K_w \sigma_w + r \eta_w \sigma_w + K_w \eta_w} (1 - F_{TRW}(\mu))}{\mu^2} \quad (5.10)$$

$$\frac{1}{\mu_w^{ho}} = -(F_{TMC}^{ho,w})'(0) = \frac{(1 - F_{TRW}(\mu))}{\mu} \quad (5.11)$$

Des équations similaires peuvent facilement être déduites pour une cellule 3G en échangeant judicieusement les indices w et c

5.1.3 Expressions des probabilités de soft handoff

La probabilité du soft handoff est définie comme la probabilité qu'un appel requiert au moins une autre relève durant sa durée de vie résiduelle. Nous définissons le soft handoff comme la requête, faite par une station mobile multi-mode, d'un nouveau canal du AP/BS suivant, une période de temps, appelée période de bi-casting, juste avant la libération du canal occupé dans le AP/BS courant. Par contraste, un hard handoff est défini comme une requête d'un nouveau canal du AP/BS suivant, immédiatement après la libération du canal dans le AP/BS courant. Dans notre modèle, le soft handoff est déclenché après le temps écoulé dans la région de cœur WLAN (RW), par contraste au hard handoff qui est déclenché plus tard, c'est à dire après l'écoulement du temps de résidence dans toute la région $TRW = RW + RWC$. Par conséquent, il est possible de reformuler les expressions de probabilité de relève dans les équations 12 et 16 établies par Fang (2005) pour le cas particulier de notre problème. En effet, en remplaçant F_{TRW} par F_{RW} et η_{TRW} par η_w , nous obtenons les expressions suivantes pour les probabilités de soft handoff des nouveaux appels et des appels en relève dans une cellule WLAN :

$$P_h^{new,w} = \frac{\eta_w}{\mu} (1 - F_{RW}(\mu)) \quad , \quad P_h^{ho,w} = F_{RW}(\mu) \quad (5.12)$$

Notons que les expressions développées pour le TMC dans l'équation 5.11 et pour la probabilité de relève dans l'équation 5.12 tiennent compte de la région du soft handoff que nous avons introduite dans notre nouveau modèle. Toutefois, les performances du système 3G/WLAN en termes de probabilités de blocage restent encore à analyser en se basant sur les modèles d'occupation de la capacité et du contrôle d'admission optimal présentés dans

les chapitres précédents.

5.2 Algorithmes de soft handoff et analyse de performance

Puisque le soft handoff consomme des ressources en double sur plus qu'une station de base afin d'effectuer une relève sans coupure, il est souhaitable d'optimiser l'utilisation des ressources surtout celles des cellules 3G qui sont coûteuses et généralement très chargées. Pour cela, la durée du soft handoff doit être minimisée à son strict minimum nécessaire pour satisfaire les contraintes de QoS au niveau paquet. Toutefois, les implémentations standards du soft handoff sont simples et triviales mais ne sont pas efficaces. Un soft handoff qui est efficace dans l'utilisation des ressources est souvent complexe à implémenter et à déployer puisqu'il est difficile de prédire avec une bonne précision l'instant optimal pour déclencher le soft handoff dans un environnement sans fil et mobile, dynamique et variable.

5.2.1 Le soft handoff standard STSHO

Une station mobile multi-mode qui maintient un appel de voix sur son interface W-CDMA, mesure périodiquement la puissance du signal reçu (RSS) sur les stations de base ou les points d'accès avoisinants et quand cette puissance atteint un seuil pré-défini (RSS_{in} pour le WLAN), la station mobile déclenche le soft handoff vers la cellule la plus adéquate qui doit être de préférence une cellule WLAN. Toutefois, lorsque la station mobile maintient un appel de voix sur l'interface WLAN, il est plus convenable de mesurer le RSS de la cellule WLAN courante au lieu de celui de la cellule avoisinante. En effet, le changement continu de canaux pour mesurer les RSS des cellules voisines durant l'activité des appels de voix peut dégrader la qualité de la voix significativement. Généralement, lorsque le RSS courant diminue au-dessous d'un certain seuil noté RSS_{add} , le soft handoff est déclenché de préférence vers une cellule WLAN avoisinante, sinon vers une cellule 3G en superposition.

En utilisant un mécanisme de moyenne mobile du RSS (Bing *et al.*, 2003) afin de lisser les fluctuations dues à l'ombrage radio (shadowing), le niveau du RSS peut être modélisé comme suit :

$$RSS(i\theta) = R_0 - 10n \log d(i\theta) \text{ dBm} \quad (5.13)$$

$$d^2(i\theta) = v_i^2(i\theta)^2 + d_0^2 - 2d_0v_i i\theta \cos(\alpha) \quad (5.14)$$

n désigne l'indice de pente de la courbe du RSS, qui est généralement égal à 4 pour les micro-cellules dans un environnement urbain. Nous supposons l'utilisation du modèle de vitesse de la station mobile qui est illustré à la Figure 5.3, où v est l'intensité de la vitesse et α est l'angle de la direction du mouvement de la station mobile. Nous supposons que l'intervalle de temps de longueur θ , qui est relatif à la périodicité de l'échantillonnage et du calcul de la moyenne mobile du RSS, est assez court pour que v et α soient constants durant cet intervalle.

5.2.2 Le soft handoff efficace en utilisation de ressources RESHO

Dans le but de minimiser l'utilisation coûteuse des cellules 3G souvent surchargées, un algorithme de soft handoff optimisant l'utilisation des ressources, appelé RESHO, estime et ajuste des valeurs seuils RSS optimales pour le déclenchement du soft handoff à l'instant optimal en fonction de la vitesse de la station mobile et de la latence de signalisation de la relève. Nous supposons que la vitesse de la station mobile et sa direction restent constantes juste avant d'entrer ainsi qu'à l'intérieur de la région du soft handoff, puisque le temps de résidence dans la région de soft handoff est assez court par rapport au TRC assez élevé du WLAN. Notons que des algorithmes de soft handoff plus ou moins efficaces sont présentés dans la littérature (Zahran *et al.*, 2006; Guan *et al.*, 2006) mais ne sont pas évalués en

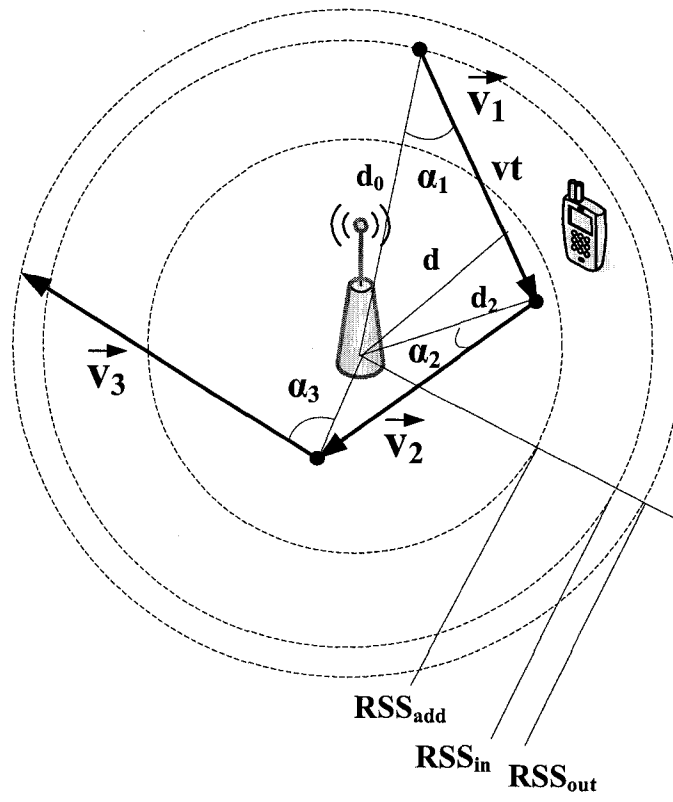


FIGURE 5.3 Seuils RSS du WLAN pour le déclenchement de la relève

terme de performance de blocage comme nous le faisons dans notre travail. Une conception possible d'un algorithme RESHO est la suivante : à chaque début d'intervalle i , l'algorithme RESHO estime la variation de la pente du RSS en utilisant l'équation 5.14 ainsi que les valeurs du RSS mesurées précédemment. Ensuite, il utilise cette estimation pour prédire l'instant optimal, noté i_{add} , pour lequel un soft handoff doit être déclenché. i_{add} peut être approximé par l'intervalle durant lequel le soft handoff doit être déclenché dans le but d'établir l'appel de voix de bout en bout sur la station de base suivante avant que le RSS courant ne chute au-dessous du niveau de seuil de sortie du WLAN RSS_{out} . L'information sur la latence de la relève et de l'établissement du même appel de voix de bout-en-bout sur une station de base différente peut être communiquée à partir d'une table d'historique implantée dans la passerelle d'accès sans-fil (WAG), c'est-à-dire l'équipement qui interconnecte les deux domaines administratifs des deux réseaux de cœurs respectifs du réseau 3G et du réseau WLAN illustré à la Figure 4.1. Puisque le but est plutôt de fournir un modèle pour l'étude des performances de cet algorithme, sa conception ne sera pas détaillée dans notre travail.

5.2.3 Analyse du temps de résidence pour RESHO vs. STSHO

Dans le but de quantifier le gain de performance obtenu en utilisant l'algorithme RESHO comme nous l'avons décrit, nous exprimons le TRC moyen dans la région cœur de la cellule WLAN t_{RW} et dans toute la cellule WLAN t_{TRW} pour les deux algorithmes RESHO et STSHO. Rappelons que STSHO est basé sur un seuil pré-planifié $RSS_{add} = \rho RSS_{out}$ configuré pour toutes les stations mobiles. Nous supposons que chaque station mobile entre dans la cellule WLAN à l'instant $t = 0$ et la quitte à l'instant $t = t_{TRW}$ avec une vitesse constante v et une direction constante α . Nous supposons aussi qu'un mécanisme de boucle d'hysteresis est implémenté pour le RSS dans le but de prévenir les effets de

va-et-vient (ping-pong) aux frontières des cellules adjacentes. Par conséquent, nous distinguons entre des seuils RSS différents pour entrer (RSS_{in}) et pour sortir (RSS_{out}) d'une cellule WLAN comme illustré à la Figure 5.3. Ainsi :

$$RSS(0) = R_0 - 10n \log d_0 = RSS_{in} \quad (5.15)$$

$$RSS(t_{RW}) = R_0 - 10n \log d(t_{RW}) = RSS_{add} \quad (5.16)$$

$$RSS(t_{TRW}) = R_0 - 10n \log d(t_{TRW}) = RSS_{out} \quad (5.17)$$

$$\eta(x) = \frac{v}{d_0 \cos \alpha + \sqrt{d_0^2 \cos^2 \alpha - d_0^2 + (e^{\frac{R_0 - x}{10n}})^2}} \quad (5.18)$$

$$\eta_{TRW} = \frac{1}{t_{TRW}} = \eta(RSS_{out}) \quad (5.19)$$

Par conséquent, pour STSHO et RESHO nous avons :

$$\eta_w = \frac{1}{t_{RW}} = \eta(RSS_{add}) \quad , \quad \sigma_w = \frac{1}{t_{sig}} = \frac{1}{t_{TRW} - (r/K_w) - t_{RW}} \quad (5.20)$$

$$\eta_w^* = \frac{1}{t_{TRW} - (r/K_w) - t_{sig}^*} \quad , \quad \sigma_w^* = \frac{1}{t_{sig}^*} \quad (5.21)$$

Pour différentes vitesses et un seuil donné du RSS RSS_{add} , il est possible d'utiliser les équations précédentes pour calculer η_w et σ_w pour l'algorithme STSHO et η_w^* pour l'algorithme RESHO. $1/\sigma_w^*$ est la latence moyenne de la signalisation de la relève qui se trouve être indépendante de la vitesse de la station mobile.

Dans le but d'aider le lecteur à se retrouver dans toutes les désignations et les symboles utilisées, nous les résumons dans le tableau 5.1.

TABLEAU 5.1 Résumé des symboles les plus importants

Symbole	Définition
Paramètres de trafic	
k	Indice de représentation d'une cellule WLAN si $k=w$ et une cellule 3G si $k=c$
λ_k	Taux d'arrivée moyen des nouveaux appels à la cellule k
μ	Temps de maintien d'appel
$\mu_k^{new} (\mu_k^{ho})$	Temps de maintien du canal pour un nouvel appel (appel en relève) dans la cellule k
$\eta_w (\eta_c)$	Paramètre de moyenne du temps de résidence dans la région de cœur d'une cellule WLAN (cellule 3G)
$\alpha_w (\alpha_c)$	Paramètre de variabilité du temps de résidence dans la région de cœur d'une cellule WLAN (cellule 3G)
$\sigma_k (K_k)$	Moyenne de la partie variable (partie constante) du temps de résidence dans une cellule k
η_{TRW}	Paramètre moyen de temps de résidence dans une cellule WLAN
$TRW (CRT)$	Temps de résidence dans une cellule WLAN (cellule 3G)
p^{c-w}	Probabilité de relève verticale volontaire de la cellule 3G courante vers une cellule WLAN en superposition
$v_k (v_k^v)$	Taux de relève horizontale (verticale) vers une cellule k
Paramètres de CAC	
$g_k (g_k^c)$	Capacité de garde fractionnelle limitée (CGFL) pour les nouveaux appels (appels en relève) vers une cellule k
$\beta_k(.,.) (\beta_k^c(.,.))$	Fonction de probabilité d'acceptation des nouveaux appels (appels en relève verticale) dans une cellule k
c_k	Capacité d'une cellule k en terme de nombre maximal d'appels de voix
$P_d^{k,max} (P_d^k)$	Probabilité maximale permise pour les coupures d'appels dans le réseau k séparé
$P_d^{w-c,max} (P_d^{w-c})$	Probabilité maximale permise pour les coupures d'appels dans le réseau 3G/WLAN intégré
ε	Résolution de l'estimation des taux de relèves et des probabilités d'état à l'équilibre
Métriques de QoS	
P_b^k	Probabilité de blocage des nouveaux appels demandant l'admission au réseau k
$P_f^k (P_{fv}^k)$	Probabilité d'échec des relèves horizontales (verticales) vers le réseau k
$P_h^{new,k} (P_h^{ho,k})$	Probabilité qu'un nouvel appel (appel en relève) effectue une relève future de la cellule k
P_h^k	Probabilité moyenne qu'un appel (nouvel appel ou un appel en relève) effectue une relève future de la cellule k
Paramètres relatifs à la puissance du signal reçu (RSS)	
RSS_0	Puissance du signal reçu à l'instant initial $t=0s$
RSS_{in}	Seuil de la puissance du signal reçu qui déclenche l'association à la cellule WLAN
RSS_{add}	Seuil de la puissance du signal reçu qui déclenche le soft handoff STSHO vers une cellule WLAN ou une cellule 3G
RSS_{out}	Seuil de la puissance du signal reçu qui déclenche la sortie de la cellule WLAN courante
n	Indice de pente du modèle de puissance de signal reçu
$d(.)$	Distance entre la station mobile et le point d'accès WLAN en fonction du temps
$v_i (\alpha_i)$	Vitesse (Angle entre le diamètre d'une cellule WLAN et la direction de mouvement) de la station mobile dans le WLAN durant l'intervalle de temps i
i_{add}	Intervalle de temps idéal pour lequel l'algorithme de soft handoff efficace (RESHO) doit se déclencher
θ	Longueur de l'intervalle de temps pour le moyennage du RSS et l'estimation de la pente du RSS sous la vitesse courante
Autres paramètres	
m	Nombre de cellules WLAN en superposition avec une cellule 3G
r	Nombre de stages de la distribution d'Erlang utilisée pour approximer une distribution constante
P_{cov}	Probabilité que nul autre point d'accès peut être découvert avant d'atteindre le seuil de puissance de signal reçu indiquant une sortie imminente de la cellule WLAN courante

5.3 Résultats de performance et interprétations

La Figure 5.4 montre que sous l'algorithme STSHO, le TRC moyen dans une cellule WLAN, noté TRW, diminue significativement avec l'augmentation de la vitesse moyenne de la station mobile dans la région WLAN. Par conséquent, nous déduisons que la vitesse moyenne dans un intervalle de 0.5 m/s à 4 m/s a un impact important sur le TRW ainsi que

sur le temps de résidence moyen dans la région du soft handoff $t_{TRW} - t_{RW1}$. Par exemple, quand un usager d'une station mobile quitte son bureau en basculant d'un environnement piéton intérieur vers un environnement piéton extérieur et ensuite vers un environnement véhiculaire, le TRW dans les différentes cellules WLAN diminue rapidement de 400 à 50 secondes, et le temps de résidence moyen dans les régions du soft handoff correspondantes diminue rapidement de 100 s à 15 s. Pour les résultats présentés aux Figures 5.5, 5.7 et 5.6,

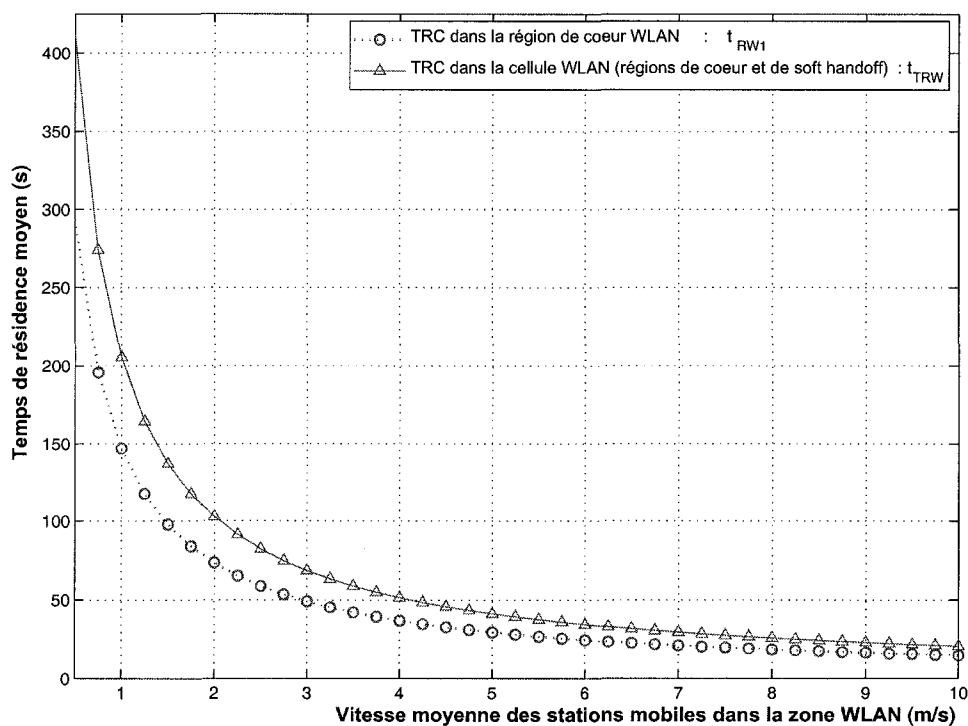


FIGURE 5.4 TRC dans la région de cœur/soft handoff en fonction de la vitesse

il est intéressant de noter que sous tous les schémas de mobilité dans la région du WLAN (des vitesses de stations mobiles avec différentes moyennes de 0.5 m/s à 4 m/s et différentes variabilités de 1 à 6), les gains en performances de l'algorithme RESHO surpassent ceux de STSHO en termes de probabilités de blocage données par le contrôle d'admission

optimal. Ceci est dû au fait qu'en moyenne, les ressources des capacités dupliquées pour le soft handoff sont occupées pour une période de temps plus courte en utilisant un algorithme RESHO. Notons que la probabilité de coupure d'appels initiés dans le réseau 3G n'a pas été présentée puisqu'elle est constante et égale à son seuil limite de ($P_d^{c,max} = 10^{-2}$), ce qui est dû à la charge élevée du réseau 3G. Nous remarquons à la Figure 5.7 que l'augmen-

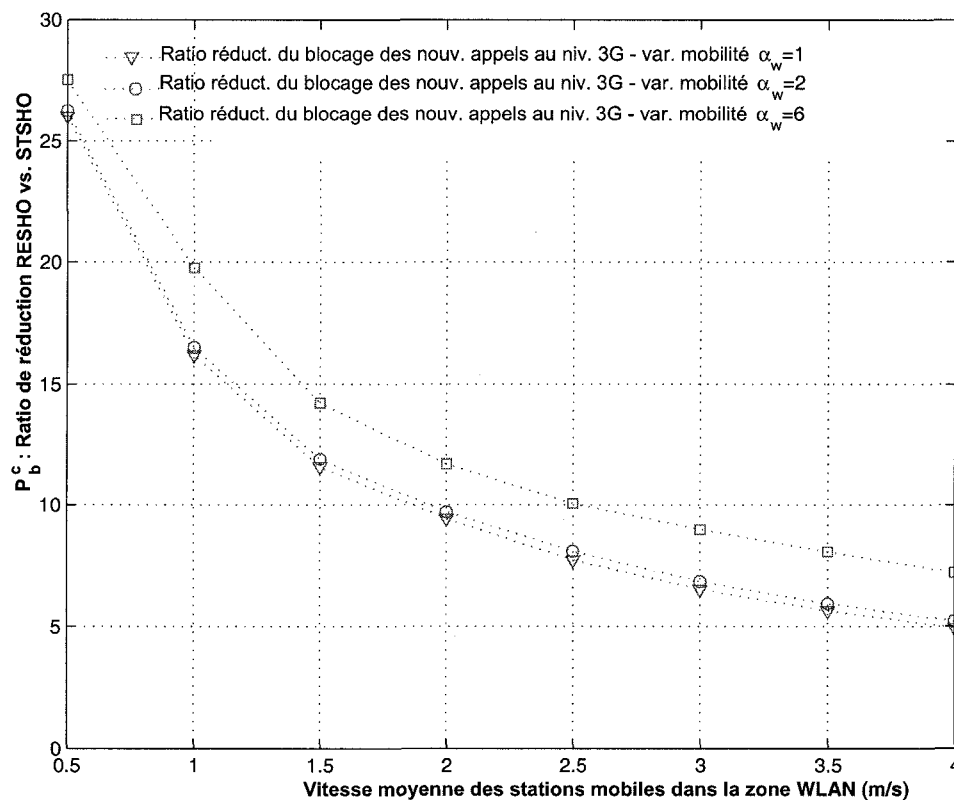


FIGURE 5.5 Ratio de réduction de la probabilité de blocage au niveau 3G

tation de la vitesse moyenne dans la zone WLAN augmente la probabilité de blocage des nouveaux appels dans les cellules WLAN ce qui semble contre-intuitif puisqu'une faible durée d'occupation du canal laisse plus de capacité disponible pour les nouveaux appels. Toutefois, cette constatation peut être expliquée par l'augmentation du trafic de soft han-

doff au niveau WLAN qui est ré-injecté dans les cellules WLAN avec plus de ressources occupées, et par conséquent ceci fait augmenter la charge WLAN beaucoup plus qu'une vitesse plus élevée la fait diminuer. De plus, nous notons que l'augmentation de la variabilité

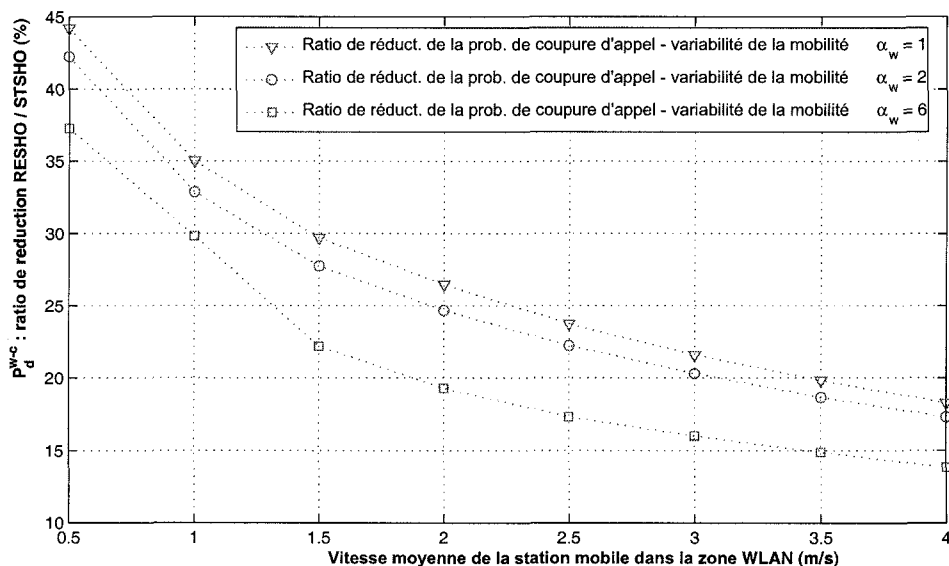


FIGURE 5.6 Ratio de réduction de la probabilité de coupure globale

de la vitesse α_w dans la zone WLAN engendre une diminution de la probabilité de blocage des nouveaux appels dans le réseau WLAN. En effet, nous savons qu'une variabilité α_w des vitesses des stations mobiles qui est plus importante indique qu'un nombre plus important d'utilisateurs restent dans le WLAN pour une courte durée (utilisateurs rapides) et un nombre moins important d'utilisateurs restent pour une longue durée (utilisateurs lents). Alors, une plus grande proportion d'appels de voix initiés dans la zone WLAN peut être accommodée par un WLAN à faible charge, ce qui par conséquent libère la cellule 3G du trafic en débordement.

Plus intéressant encore, il est noté que l'algorithme RESHO fournit un gain de performance encore plus élevé que celui fourni par l'algorithme STSHO pour des vitesses faibles

des stations mobiles. En effet, nous remarquons aux figures 5.5 et 5.6 que le ratio de réduction de la probabilité de blocage des nouveaux appels dans les cellules 3G et le ratio de réduction de la probabilité de coupure des appels augmentent quand les vitesses moyennes des stations mobiles diminuent. En effet, la diminution des vitesses des stations mobiles induit une augmentation de l'écart entre le temps de résidence dans la région du soft handoff délimitée par le STSHO et le temps de résidence dans la région du soft handoff délimitée par le RESHO. De plus, quand les ressources du soft handoff sont consommées durant une plus courte durée, les probabilités de blocage sont réduites significativement.

En plus d'un meilleur gain de performance lorsque les vitesses des stations mobiles sont faibles, quand la variabilité des vitesses des stations mobiles est élevée ($\alpha_w = 6$) le gain de performance en terme de probabilité de blocage des nouveaux appels dans le réseau 3G devient plus important. Ceci s'explique par l'augmentation de la variabilité de la vitesse qui induit un multiplexage statistique plus élevé dans l'occupation de la capacité du WLAN, ce qui induit à son tour moins de blocage au niveau WLAN et moins d'échecs de relèves WLAN. Par conséquent, nous avons moins de trafic en débordement vertical vers le haut et par suite la probabilité de blocage des nouveaux appels dans le réseau 3G diminue. Puisqu'un profil de mobilité ayant une faible moyenne et une haute variance des vitesses des stations mobiles caractérise typiquement un environnement de mobilité dans une zone WLAN (Thajchayapong et Peha, 2006), les concepteurs des réseaux WLAN pourront être poussés à implémenter l'algorithme RESHO si son gain en blocage d'appels estimé par le modèle que nous avons proposé est tout à fait appréciable. Ce gain en performance assez significatif qui est fourni par l'algorithme RESHO dans des environnements à faible mobilité le rend plus facile à implementer. En effet, quand la vitesse moyenne de la station mobile reste faible, un nombre beaucoup plus important d'échantillons de RSS peut être récolté et utilisé pour prédire un temps de résidence beaucoup plus précis dans la région du soft handoff délimitée par le RESHO.

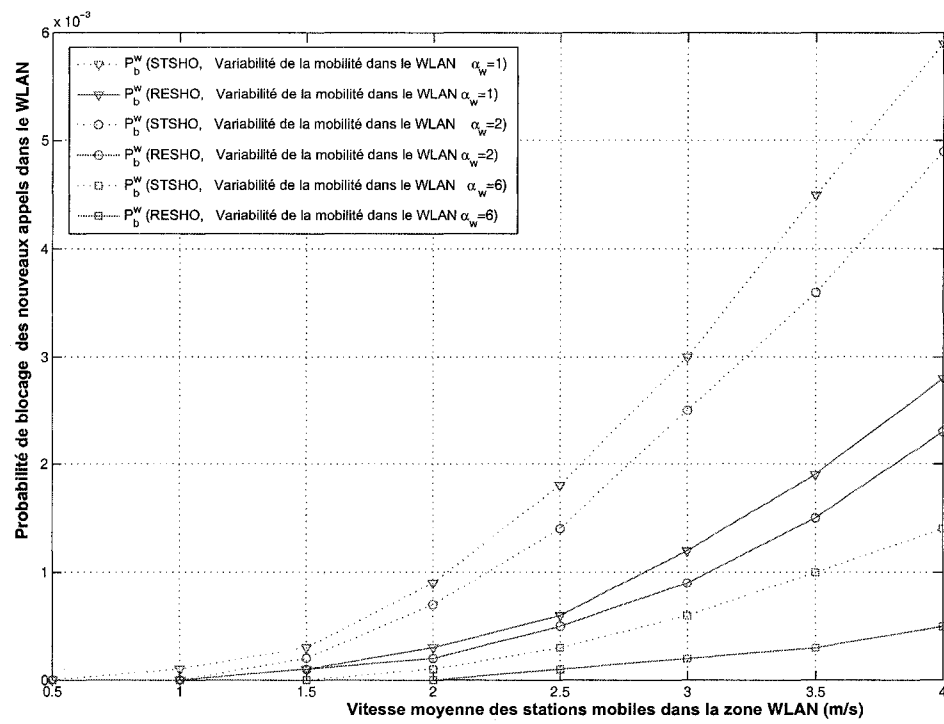


FIGURE 5.7 Probabilité de blocage WLAN pour STSHO vs. RESHO

5.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé un nouveau modèle analytique dans le but d'évaluer la probabilité de blocage des nouveaux appels et la probabilité de coupure des appels en cours sous un algorithme de contrôle d'admission optimal pour les appels de voix qui a été redéfini pour un réseau 3G/WLAN faiblement intégré. Ce modèle utilise des distributions de temps de résidence qui sont beaucoup plus précises et tient compte de la région du soft handoff pour chaque cellule 3G/WLAN pour laquelle les ressources de bande passante sans fil sont occupées simultanément dans deux cellules pour un même appel de voix. Les résultats de performances montrent que la délimitation de la région de soft handoff en utilisant un algorithme de soft handoff plus ou moins efficace a un grand impact sur les probabilités de blocage données par le contrôle d'admission optimal. Particulièrement, il a été observé que la réduction de la probabilité de blocage des nouveaux appels gagnée en utilisant un algorithme de soft handoff optimal en efficacité d'allocation de ressources (RESHO) comparativement à un algorithme de soft handoff standard (STSHO) est largement augmentée quand les vitesses des stations mobiles ont une faible moyenne et une forte variabilité ; ce qui caractérise typiquement un environnement de mobilité dans une zone WLAN. Le modèle que nous proposons peut aider les concepteurs des réseaux à déterminer si les performances gagnées par un algorithme optimal RESHO par rapport à ceux d'un algorithme standard sont assez significatives pour considérer son implémentation complexe.

CHAPITRE 6

CONCLUSION

Un RMHPG intégrant les réseaux mobiles actuels et futurs de divers opérateurs va être le choix indéniable pour construire un réseau mobile global de prochaine génération fournissant une mobilité universelle et transparente à des stations mobiles multi-mode multi-interface ou à interface radio cognitive leur permettant un accès ubiquitaire à des services conversationnels critiques. Plusieurs problématiques sont identifiées lors de l'intégration d'un RMHPG, la plupart d'entre elles peuvent être résolues par une bonne planification et une bonne configuration des algorithmes régissant cette intégration. Souvent ceci doit faire intervenir des compromis et des optimisations qui doivent être effectués pour un certain nombre de facteurs tels que les garanties de QoS au niveau paquet, les garanties de QoS au niveau appel, la flexibilité de l'intégration, l'efficacité de l'allocation de ressources, etc. Pour cela, des modèles et des algorithmes ont été proposés dans cette thèse permettant ainsi aux concepteurs, planificateurs et intégrateurs d'un RMHPG donné, d'optimiser ou de trouver le bon compromis désiré entre ces différents facteurs.

Rappelons qu'aucun des modèles présentés dans la littérature ne tient compte des nouvelles capacités et des caractéristiques hétérogènes d'un RMHPG d'une manière aussi complète et précise que celle adoptée dans cette thèse. Rappelons aussi que dans cette thèse nous avons apporté plusieurs contributions originales qui sont : un cadre analytique générique et précis pour l'évaluation de la QoS au niveau appel de n'importe quel RMHPG ; un modèle d'évaluation des performances du contrôle d'admission optimal de voix dans un réseau WLAN/3G intégré selon différents schémas d'intégration ; un modèle de soft handoff vertical permettant d'évaluer avec précision accrue son impact sur les performances du contrôle d'admission optimal de voix dans un réseau WLAN/3G faiblement intégré.

6.1 Synthèse des travaux

Dans cette thèse, nous avons proposé des modèles et algorithmes génériques permettant la prédiction des performances de n'importe quelle combinaison de réseaux mobiles hétérogènes intégrés dans un RMHPG. En outre, nous nous sommes intéressés au cas d'un RMHPG typique, celui d'un réseau 3G/WLAN intégré, et nous avons proposé un modèle permettant de prédire ses performances sous différents schémas d'intégration, tout en considérant un contrôle d'admission optimal adapté à chaque schéma d'intégration. Les résultats de performance validés par des simulations à événements discrets montrent que le contrôle d'admission optimal re-conçu pour le schéma d'intégration faible offre globalement les meilleures probabilités de blocage en plus de la flexibilité de l'architecture d'intégration. En outre, nous avons étudié les performances de ce même type de RMHPG sous différentes configurations d'algorithmes de soft handoff conçus pour garantir la QoS au niveau paquet lors de la relève verticale problématique dans un schéma d'intégration faible. Nous avons remarqué que, dans un environnement de mobilité faible et hautement variable qui, typiquement caractérise la région WLAN, le gain de performance du contrôle d'admission optimal sous un soft handoff optimal en efficacité d'allocation de la bande passante dispendieuse du 3G, est beaucoup plus élevé que pour tout autre environnement de mobilité. En utilisant le modèle numérique que nous proposons, le planificateur du réseau peut estimer si ce gain de performance est assez significatif pour considérer un algorithme de soft handoff optimal qui est assez complexe à implanter.

6.2 Limitations des travaux

Étant donné que dans un RMHPG typique, les relèves verticales volontaires ne sont pas aussi nécessaires et sont beaucoup moins fréquentes que les relèves verticales obligatoires, nous nous sommes limités à l'étude approfondie d'une stratégie de débordement qui

néglige le trafic d'appels en relève verticale volontaire. Cette limitation vient du fait qu'il n'est facile de développer une expression analytique simple (sous forme fermée) de la probabilité de coupure d'appel qu'en éliminant les relèves verticales volontaires. D'un autre côté, en considérant ce type de relèves volontaires dans le calcul exact des probabilités de coupure d'appel, nous avons introduit une complexité d'analyse qui n'est avantageuse dans notre cas que si les conditions d'occurrence de ce type de relève sont bien définies par les préférences de l'utilisateur et les stratégies des opérateurs. Par exemple, une stratégie qui implémente des relèves volontaires pour le balancement de la charge entre les réseaux ne serait pas facile à modéliser et, dans ce cas, des algorithmes itératifs d'estimation et des modèles de simulation peuvent être utilisés.

Une des autres limitations de nos travaux est que nous avons limité notre étude des performances du schéma d'intégration et du soft handoff aux réseaux WLAN/3G intégrés seulement. Il aurait été possible d'étendre cette étude à des réseaux à trois niveaux tel qu'un réseau WLAN/3G/2.5G intégré. De plus, nous nous sommes limités au réseau WLAN opérant en mode d'accès centralisé PCF afin d'avoir une capacité en terme de nombre d'appels de voix qui est indépendante de la capacité en terme d'appels de données, ce qui nous facilite la modélisation de l'occupation de la capacité par des chaînes de Markov à deux dimensions. Rappelons que, généralement, les appels de données sont considérés comme du trafic élastique et, par conséquent, ils peuvent partager la capacité résiduelle en n'importe quel nombre sans être bloqués. Toutefois, si le délai ou le temps de leur service augmente indéfiniment il serait judicieux de leur allouer une fraction de la capacité qui leur est exclusivement réservée comme nous l'avons fait, en supposant un schéma d'accès restreint pour le partage des ressources entre classes de service. En effet, nous avons donné à la classe d'appels de voix une priorité preemptive d'accès à la fraction réservée de la capacité totale sur les autres classes qui lui sont moins prioritaires. Toutefois, ce modèle de plusieurs classes de services, bien qu'il soit assez efficace, ne peut pas être appliqué aux réseaux

WLAN opérant en mode d'accès distribué (DCF) puisque la préemption est impossible et ne peut donner les performances de blocage d'appel d'une classe qu'au pire cas où les fractions de capacité des autres classes sont saturées. Et, finalement, ce modèle ne peut donner les performances de délais pour les appels élastiques de données.

6.3 Indications de recherches futures

Aujourd'hui, la technologie d'accès sans fil WiMax mobile selon le standard IEEE 802.16e est en train de gagner de la popularité. Cette technologie peut être considérée comme un des moyens permettant de contourner la faible couverture des réseaux WLAN au prix d'une plus faible capacité de transmission. En effet, une station de base WiMax mobile peut émettre sur plusieurs kilomètres, facilitant ainsi le déploiement d'un réseau métropolitain WiMax sur une couverture extrêmement plus large que celle d'un réseau local WLAN. Ainsi, il serait intéressant d'intégrer un réseau WiMax dans un RMHPG intégrant ainsi WLAN, WiMax, 3G et 2.5G. Nos modèles génériques proposés au chapitre 3 seront tout à fait valides pour étudier les performances d'un tel RMHPG. Par contre, les modèles et algorithmes présentés aux chapitres 4 et 5 pour l'étude de l'impact de l'intégration et du soft handoff sur les performances du contrôle d'admission optimal doivent être réadaptés à un tel RMHPG et peuvent faire le sujet d'un futur travail de recherche.

D'un autre côté, des modèles d'occupation de bande passante plus efficaces et évolués pour des classes d'appels multiples peuvent être développés dans le but de donner les performances exactes en terme de blocage d'appels d'une classe en fonction de l'occupation des autres classes d'appels. Par exemple, des chaînes de Markov à dimensions multiples peuvent être utilisées dans ce cas. Pour les WLAN opérant le mode DCF, des modèles analytiques pour déterminer la région de la capacité en fonction de l'occupation des différentes autres classes d'appels peuvent être développés conjointement avec les modèles que nous

avons proposés dans cette thèse.

Finalement, nous avons montré dans cette thèse que l'algorithme de soft handoff vertical efficace (RESHO) que nous avons modélisé et étudié donne des gains de performances assez intéressants. Et par conséquent, il serait intéressant de concevoir cet algorithme avec tous ses détails, dans l'objectif d'une implementation réelle, notamment au niveau de l'estimation de la latence de la relève et de la prédiction de la vitesse de la station mobile à l'intérieur de la zone WLAN. Une direction de recherche serait alors de proposer et de concevoir un algorithme RESHO qui, non seulement, doit être relativement simple et rapide pour s'exécuter au sein de la station mobile, mais aussi il doit être précis dans la prédiction de l'instant optimal pour déclencher le soft handoff vertical.

Bibliographie

- 3GPP (1999). TR 22.925 : Service aspects : Quality of service and network performance V3.1.1. Rapport technique, 3GPP.
- ABONDO, C. et PIERRE, S. (2005). Hierarchical proxy mobile resource reservation protocol for mobile IP networks. *IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob'05)*. Montreal, Canada, 228–234.
- BARTOLINI, N. et CHLAMTAC, I. (2001). Improving call admission control procedures by using handoff rate information. *Wiley Wireless Communications and Mobile Computer Journal*, 1, 257–268.
- BEN ALI, R. et PIERRE, S. (2007). Efficient guard band based admission control in heterogeneous wireless overlay networks using generally distributed cell residence time. *Wireless and Mobile Communications, 2007. ICWMC'07. Third International Conference on*, 2–2.
- BEN ALI, R. et PIERRE, S. (2008). Optimal voice admission control performance under soft vertical handoff in loosely coupled 3G/WLAN networks. *Wireless Communications and Networking Conference, 2008. WCNC. 2008 IEEE*, 1.
- BEN ALI, R., PIERRE, S. et LEMIEUX, Y. (2004). Diffserv QoS performance evaluation of multimedia telephony. *IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*. vol. 4, 2115–2118.
- BEN ALI, R., PIERRE, S. et LEMIEUX, Y. (2005). UMTS to IP backbone QoS mapping for voice and video-telephony services. *IEEE Network*, 18, 26–32.

- BING, H., HE, C. et JIANG, L. (2003). Performance analysis of vertical handover in a UMTS-WLAN integrated network. *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2003. PIMRC 2003. 14th IEEE Proceedings on*, 1.
- CHANG, C., CHANG, C. et LO, K.-R. (1999). Analysis of a hierarchical cellular system with reneging and dropping for waiting new and handoff calls. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 4, 1080–1091.
- CHENG, S. T. et LIN, J. L. (2005). IPv6-based dynamic coordinated call admission control mechanism over integrated wireless networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 23, 2093–2103.
- CHLEBUS, E. et LUDWIN, W. (1995). Is handoff traffic really Poissonian? *Universal Personal Communications. 1995. Record., 1995 Fourth IEEE International Conference on*, 348–353.
- EL-KADI, M., OLARIU, S. et ABDEL-WAHAB, H. (2002). A rate-based borrowing scheme for QoS provisioning in multimedia wireless networks. *IEEE Transactions Parallel and Distributed Systems*, 13, 156–166.
- FANG, Y. (2003). Thinning schemes for call admission control in wireless networks. *IEEE Transactions on Computing*, 52, 685–687.
- FANG, Y. (2005). Modeling and performance analysis for wireless mobile networks : a new analytical approach. *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, 13, 989–1002.
- FANG, Y. et CHLAMTAC, I. (1999). Teletraffic analysis and mobility modeling of PCS networks. *IEEE Transactions on Communications*, 47, 1062–1072.
- FANG, Y. et LIN, I. (1998). Channel occupancy times and handoff rate for mobile computing and PCS networks. *Computers, IEEE Transactions on*, 47, 679–692.

- GAO, D., CAI, J. et NGAN, K. N. (2005). Admission control in IEEE 802.11e wireless LANs. *IEEE Network*, 19, 6–13.
- GHADERI, M. et BOUTABA, R. (2003). Call admission control in mobile cellular networks : a comprehensive survey. *Wireless Communications and Mobile Computing (WCMC)*. *vol 11*, 69–93.
- GUAN, W., LING, X., SHEN, X. et ZHAO, D. (2006). Handoff trigger table for integrated 3G/WLAN networks. *International Conference On Communications And Mobile Computing*, 575–580.
- HAN, M. et NILSSON, A. (2000). Population-based call admission control in wireless cellular networks communications. *Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC'00)*. vol. 3, 1519–1523.
- HARSHA, S., KUMAR, A. et SHARMA, V. (2006). An analytical model for the capacity estimation of combined VoIP and TCP file transfers over EDCA in an IEEE 802.11e WLAN. *Quality of Service, 2006. IWQoS 2006. 14th IEEE International Workshop on*, 178–187.
- HOLMA, H. et TOSKALA, A. (2004). *WCDMA for UMTS : Radio Access for Third Generation Mobile Communications*. John Wiley and Sons.
- HONG, D. et RAPPAPORT, S. (1986). Traffic model and performance analysis for cellular mobile radio telephone systems with prioritized and nonprioritized handoff procedures. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 35, 77–92.
- IEEE 802.11E-WORKING-GROUP (2005). IEEE Standard 802.11e wireless LAN medium access control and physical layer specifications, medium access control quality of service enhancements. *IEEE Standards*.

- KELLY, F. (1996). Notes on effective bandwidth. *Stochastic Networks : Theory and Applications*, 4, 141–168.
- KLEINROCK, L. (1975). *Queueing systems. Vol. 1, Theory*. Wiley.
- KOH, S., CHANG, M. et LEE, M. (2004). mSCTP for soft handover in transport layer. *Communications Letters, IEEE*, 8, 189–191.
- KWON, T., KIM, S., CHOI, Y. et NAGHSHINEH, M. (2000). Threshold-type call admission control in wireless/mobile multimedia networks using prioritized adaptive framework. *IEEE Electronics Letters*, 36, 852–854.
- LEVINE, D., AKYILDIZ, I. et NAGHSHINEH, M. (1995). The shadow cluster concept for resource allocation and call admission in ATM-based wireless networks. *Proceedings of 1st International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM'95)*. 142–150.
- MALOMSOKY, S., RACZ, S. et NADAS, S. (2003). Connection admission control in UMTS radio access networks. *Computer Communications*, 26, 2011–2023.
- NAGHSHINEH, M. et ACAMPORA, A. (1996). QoS provisioning in micro-cellular networks supporting multiple classes of traffic. *Wireless Networks*, 2, 195–203.
- NASSER, N. et HASSANEIN, H. (2005). Optimal multi-class guard channel admission policy under hard handoff constraints. *The 3rd ACS/IEEE International Conference on Computer Systems and Applications*. 53.
- OLIVIERA, C., KIM, J. et SUDA, T. (1998). An adaptive bandwidth reservation scheme for high-speed multimedia wireless networks. *IEEE JSAC*. vol. 16 de 6, 858–872.
- PACK, S., CHOI, J., KWON, T. et CHOI, Y. (2007). Fast-handoff support in IEEE 802.11 wireless networks. *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, 9, 2–12.

- RAMJEE, R., TOWSLEY, D. et NAGARAJAN, R. (1997). On optimal call admission control in cellular network. *Wireless Networks*, 3, 29–41.
- RANGO, F., FAZIO, P. et MARANO, S. (2005). Cell stay time prediction for mobility independent predictive services in wireless networks. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*. vol. 3 de 13-17, 1792–1797.
- REININGER, D. et IZMAILOV, R. (1999). Admission and bandwidth allocation for soft-QoS guarantees in mobile multimedia networks. *Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'99)*. vol. 3, 1513–1517.
- SHEN, X., LIN, Y., PANG, A. et PAN, J. (2006). Guest editorial : Voice over wireless local area network. *Wireless Communications, IEEE [see also IEEE Personal Communications]*, 13, 4–5.
- SIKDAR, B. (2007). An analytic model for the delay in IEEE 802.11 PCF MAC based wireless networks. *IEEE TRANSACTIONS ON WIRELESS COMMUNICATIONS*, 6, 1.
- SOLIMAN, H., CASTELLUCCIA, C., MALKI, K. et AL. (2005). RFC 4140 : Hierarchical mobile ipv6 mobility management.
- SONG, W., JIANG, H. et ZHUANG, W. (2007). Performance analysis of the WLAN-first scheme in cellular/WLAN interworking. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, 6, 1932–1952.
- SONG, W., JIANG, H., ZHUANG, W. et SHEN, X. (2005). Resource management for QoS support in cellular/WLAN interworking. *IEEE Network*, 19, 12–18.
- TALUKDAR, A. K., BADRINATH, B. R. et ACHARYA, A. (2001). MRSVP : A resource reservation protocol for an integrated services network with mobile hosts. *Wireless Networks*, 7, 5–19.

- THAJCHAYAPONG, S. et PEHA, J. M. (2006). Mobility patterns in microcellular wireless network. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 5, 52–63.
- VIEW, T. (2005). Solutions to performance problems in VoIP over a 802.11 wireless LAN. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 54, 366–384.
- VITERBI, A., VITERBI, A., GILHOUSEN, K., ZEHAVID, E., INC, Q. et SAN DIEGO, C. (1994). Soft handoff extends CDMA cell coverage and increases reverse link capacity. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 12, 1281–1288.
- WANG, P., JIANG, H. et ZHUANG, W. (2006). IEEE 802.11e enhancement for voice service. *IEEE Wireless Communications Magazine*, 13, 30–35.
- WU, W., LIU, G., ZHU, G., SHEN, X. et RUAN, Y. (2004). New stochastic control scheme for multiservices call admission in mobile wireless networks. *Proceedings of Emerging Technologies : Frontiers of Mobile and Wireless Communication*. vol. 2 de 31, 545–548.
- XIAO, Y., CHEN, C. L. P. et WANG, Y. (2000). A near optimal call admission control with genetic algorithm for multimedia services in wireless/mobile networks. *Proceedings of the IEEE National Aerospace and Electronics Conference. NAECON 2000. Engineering Tomorrow*. Dayton, OH, USA, 787–92.
- ZAHRAN, A., LIANG, B. et SALEH, A. (2006). Signal threshold adaptation for vertical handoff in heterogeneous wireless networks. *Mobile Networks and Applications*, 11, 625–640.
- ZENG, H. et CHLAMTAC, I. (2003). Adaptive guard channel allocation and blocking probability estimation in pcs networks. *Computer Networks*, 43, 163–176.