

Titre: Modèles et stratégies du handoff dans les réseaux ATM sans fil : performances et choix
Title: performances et choix

Auteur: Nadjia Kara
Author:

Date: 2003

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Kara, N. (2003). Modèles et stratégies du handoff dans les réseaux ATM sans fil : performances et choix [Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal].
Citation: PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/7262/>

Document en libre accès dans PolyPublie

Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/7262/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Jean Conan, & André Girard
Advisors:

Programme: Non spécifié
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

MODÈLES ET STRATÉGIES DU HANDOFF DANS LES RÉSEAUX ATM
SANS FIL: PERFORMANCES ET CHOIX

NADJIA KARA

DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

THÈSE PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE PHILOSOPHIÆ DOCTOR
(GÉNIE ÉLECTRIQUE)
NOVEMBRE 2003



National Library
of Canada

Acquisitions and
Bibliographic Services

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque nationale
du Canada

Acquisitions et
services bibliographiques

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file *Votre référence*

ISBN: 0-612-89229-8

Our file *Notre référence*

ISBN: 0-612-89229-8

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

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

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège 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 dissertation.

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

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

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

Canadä

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Cette thèse intitulée:

MODÈLES ET STRATÉGIES DU HANDOFF DANS LES RÉSEAUX ATM
SANS FIL: PERFORMANCES ET CHOIX

présentée par: KARA Nadjia

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

a été dûment acceptée par le jury d'examen constitué de:

Professeur SANSO Brunilde, Ph.D., président

Professeur CONAN Jean, Ph.D., membre et directeur de recherche

Professeur GIRARD André, Ph.D., membre et codirecteur de recherche

Professeur KADOCH Michel, Ph.D., membre

Professeur CHAMBERLAND Steven, Ph.D., membre

À ma fille Nesrine.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mes directeurs, le professeur Jean Conan et le professeur André Girard d'avoir accepté de diriger mes travaux de recherche. Leurs directives m'ont été très bénéfiques et m'ont permis de mener à bien ce travail. Je tiens à leur exprimer toute ma gratitude et ma reconnaissance.

Je remercie ma famille, qui même très loin de moi n'a cessé de me soutenir durant toutes ces années.

Je remercie tout particulièrement mon époux pour ses encouragements intarissables, sa patience sans limite et surtout d'avoir été là durant les moments les plus difficiles.

Je remercie mon adorable fille qui très jeune a compris que sa maman est une étudiante et a su s'adapter à cela.

Je remercie mes amis Souad Hadjres, Aishy Amer et Hassan Zeino pour leur soutien moral tout au long de ma recherche de doctorat.

Je remercie également l'École Polytechnique de m'avoir accueillie comme étudiante au doctorat. Je remercie également tous mes professeurs qui ont contribué à approfondir mes connaissances techniques en télécommunications.

J'adresse aussi mes remerciements et ma gratitude à L'INRS Télécommunications de m'avoir ouvert les portes de l'institut en me donnant l'accès à toutes les ressources du centre. Un grand merci pour m'avoir donné l'occasion de côtoyer la grande et formidable famille de l'INRS Télécommunications qui m'a enrichie tant au niveau scientifique que humain.

Que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail trouvent ici toute ma gratitude.

RÉSUMÉ

L'objet de notre recherche est d'étudier la fonction de handoff pour les futurs réseaux sans fil véhiculant du trafic multimédia et desservant un grand nombre d'utilisateurs mobiles.

Le handoff se déclenche lors du passage d'un usager mobile d'une cellule radio vers une autre. Il consiste en un changement de canal radio de l'ancienne station de base vers la nouvelle et peut aussi nécessiter un réacheminement dans le but de maintenir la connexion. Ces caractéristiques se doivent de garantir une utilisation efficace de la largeur de bande ainsi qu'un délai de handoff court.

Nous avons choisi d'étudier la fonction du handoff pour les réseaux ATM, car ces derniers sont capables de transporter du trafic multimédia tout en assurant un niveau de qualité de service (QS) acceptable. L'analyse des stratégies de handoff envisagées pour ce type de réseaux nous a amené à proposer une nouvelle stratégie que nous avons appelé stratégie hiérarchique. Son but est d'améliorer la gestion de la largeur de bande et de réduire le délai de handoff ainsi que la probabilité de blocage d'appels par rapport aux stratégies de handoff courantes.

Nous classons les stratégies de handoff en deux catégories, simples et hybrides. Les stratégies simples utilisent une seule procédure alors que les stratégies hybrides combinent deux procédures simples tirant profit des avantages de chacune. Le handoff hiérarchique est une stratégie hybride qui combine deux stratégies simples de handoffs, le réacheminement partiel de la connexion et l'arbre de connexions virtuelles. Nous proposons de comparer cette stratégie avec la stratégie de réacheminement partiel, qui est la plus performante parmi les stratégies de handoff simples. Nous proposons aussi une comparaison avec la stratégie de handoff hybride, à deux phases,

qui offre une réponse raisonnablement rapide au handoff ainsi qu'une gestion efficace de la largeur de bande.

Trois critères de performance sont définis pour les trois stratégies de handoff. Ils nous conduisent à estimer la largeur de bande moyenne par appel, le délai moyen par appel ainsi que la probabilité de blocage des nouveaux appels et des demandes de handoff.

Un modèle analytique est proposé pour le calcul de la largeur de bande moyenne et du délai moyen par appel des stratégies de handoff hiérarchique, à deux phases et de réacheminement partiel. Un second modèle de trafic est aussi proposé pour le calcul de la probabilité de blocage d'appels des trois stratégies de handoff. Ce modèle est basé sur la mise en réserve de canaux radio pour les demandes de handoff. Cette stratégie est souvent utilisée pour réduire la probabilité de blocage des demandes de handoff, un évènement particulièrement sensible au niveau de la perception de qualité des utilisateurs.

Un ensemble de résultats numériques est présenté pour des trafics de voix et de données dans des conditions de mobilité d'usagers élevée ou faible, et pour différentes conditions de réservation de canaux radio. Dans la majorité des cas étudiés, ces résultats démontrent qu'en comparant avec ceux des stratégies à deux phases et de réacheminement partiel, la stratégie de handoff hiérarchique utilise une largeur de bande par appel plus faible et garantit un délai moyen par appel plus court ainsi qu'une probabilité de blocage de handoff plus faible. Suite à cette analyse numérique, nous proposons diverses recommandations d'utilisation des diverses stratégies de handoff en fonction des caractéristiques de mobilité des usagers.

ABSTRACT

The main goal of our study is to analyze the handoff function in future wireless networks supporting multimedia traffic and a large number of mobile users.

The handoff procedure requires a radio channel change when a mobile moves from one cell to another. It can also require connection re-routing in order to maintain the user's communication path. All these procedures must provide an efficient bandwidth use as well as an acceptable handoff delay.

We propose to study the handoff function in the framework of ATM networks which are known to provide multimedia traffic handling within predefined criteria of service quality. In this framework, we present a new handoff strategy called hierarchical handoff, whose structure is derived from the analysis of previously proposed strategies. It turns out that this new strategy improves the overall quality of service.

The handoff strategies can be classified into two categories called simple and hybrid. The simple handoff procedures use a single handoff procedure whereas the hybrid ones combine the advantages of two simple strategies. In this respect, the hierarchical handoff is hybrid combining the partial re-routing and the virtual connection tree strategies. We compare this strategy with the previously proposed partial re-routing handoff procedure known to allow a more efficient bandwidth use and shorter handoff delay than all the other simple strategies. We also present a comparison with the two-phase handoff strategy which performs better than simple strategies.

Three performances measures are defined and estimated for the three handoff strategies. These measures are based on the expected bandwidth per call, the expected delay per call and the call blocking probability.

An analytical model is proposed to compute the expected bandwidth and delay per call for the three handoff strategies. We also propose a traffic model to evaluate

the call blocking probability. This model is based on the use of reserved channels to handle handoff calls. This strategy can reduce the handoff blocking probability a sensitive parameter in the users perception of quality of service.

Numerical results are presented for data and voice traffics, for users with large and small mobility and different channel reservation schemes. In most cases, they show that the hierarchical handoff procedure gives lower expected bandwidth and delay per call as well as smaller handoff blocking probability in comparison with the two-phase and partial re-routing handoff strategies. We conclude the study by some recommendations about the use of these strategies in wireless ATM networks depending on the users mobility characteristics either broad or local.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	v
RÉSUMÉ	vi
TABLE DES MATIÈRES	x
LISTE DES FIGURES	xvi
LISTE DES NOTATIONS ET DES SYMBOLES	xix
LISTE DES ANNEXES	xxii
GLOSSAIRE	xxiv
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Le réseau UMTS	3
1.2 Le mode de transfert asynchrone	5
1.3 Le réseau ATM sans fil	10
1.3.1 Historique de l'ATM sans fil	11
1.3.2 Architecture des réseaux ATM sans fil	12
1.4 Le réseau IP sans fil et le réseau MPLS	15
1.5 Présentation du problème	17
1.6 Objectifs de la recherche	19
1.7 Contribution	21
1.8 Structure du document	22
CHAPITRE 2 STRATÉGIES DE GESTION DU HANDOFF DANS LES RÉSEAUX ATM MOBILES	24

2.1	Stratégies de gestion du handoff	25
2.1.1	Initiation du handoff	25
2.1.2	Maintien de la continuité du lien radio	26
2.1.3	Réacheminement de la connexion	27
2.2	Exécution du handoff	27
2.2.1	Handoff request	28
2.2.2	Handoff response	28
2.2.3	Handoff confirm	29
2.2.4	Handoff confirm complete	29
2.2.5	Handoff join	29
2.2.6	Handoff join complete	30
2.3	Stratégies de réacheminement simples	30
2.3.1	Extension de la connexion	30
2.3.2	Rétablissement complet	32
2.3.3	Rétablissement partiel	34
2.3.4	Arbre de connexions virtuelles	36
2.4	Stratégies de réacheminement à deux phases	37
2.5	Stratégie de handoff hiérarchique	38
2.6	Allocation de canaux radio	44
2.7	Conclusion	46
CHAPITRE 3 ÉVALUATION DES MESURES DE PERFORMANCE . . .		48
3.1	Introduction	48
3.2	Mesures de performance	49
3.2.1	Largeur de bande	50
3.2.2	Délai du handoff	50
3.2.3	Probabilité de blocage	51

3.3	Calcul de la largeur de bande et du délai	52
3.3.1	Hypothèses	52
3.3.2	Stratégie à deux phases	57
3.3.2.1	Largeur de bande par appel de la stratégie à deux phases	60
3.3.2.2	Délai de handoff par appel de la stratégie à deux phases	63
3.3.3	Stratégie de réacheminement partiel	65
3.3.3.1	Largeur de bande par appel de la stratégie de réacheminement partiel	66
3.3.3.2	Délai de handoff par appel de la stratégie de réacheminement partiel	67
3.3.4	Stratégie hiérarchique	68
3.3.4.1	Largeur de bande par appel de la stratégie hiérarchique	70
3.3.4.2	Délai de handoff par appel de la stratégie hiérarchique	71
3.3.5	Comparaison des stratégies de handoff	72
3.4	Évaluation de la probabilité de blocage d'appels	74
3.4.1	Stratégie à deux phases	74
3.4.1.1	Modèle	74
3.4.1.2	Probabilité de blocage d'appels	75
3.4.2	Stratégie de réacheminement partiel	80
3.4.3	Stratégie hiérarchique	80
3.4.3.1	Modèle	80
3.4.3.2	Évaluation de la probabilité de blocage d'appels	82
3.4.3.2.1	Cas 1 : $C_{h1} + C_{h2} \leq C$	82
3.4.3.2.2	Cas 2 : $C_{h1} + C_{h2} > C$	87
3.5	Conclusion	91

CHAPITRE 4 RÉSULTATS NUMÉRIQUES DE L'ÉVALUATION DES MÉSURES DE PERFORMANCE	92
4.1 Introduction	92
4.2 Choix des paramètres numériques	92
4.2.1 Choix de paramètres des stratégies de réacheminement partiel et à deux phases	93
4.2.2 Choix de paramètres de la stratégie hiérarchique	94
4.2.3 Choix des paramètres communs aux trois stratégies	95
4.3 Largeur de bande et délai moyens par appel	97
4.3.1 Exemple de résultats	98
4.3.2 Résultats de la largeur de bande moyenne par appel	100
4.3.2.1 Méthode de comparaison	100
4.3.2.2 Résultats du cas réaliste de la configuration 1 où q est variable	100
4.3.2.3 Résultats du cas réaliste de la configuration 2 où q est variable	105
4.3.2.4 Résultats du cas réaliste de la configuration 1 et 2 où q est fixé	106
4.3.2.5 Résultats du cas critique de la configuration 1 et 2 où q est variable	107
4.3.2.6 Résultats du cas critique de la configuration 1 et 2 où q est fixé	107
4.3.2.7 Analyse des résultats	113
4.3.3 Résultats du délai moyen par appel	113
4.3.3.1 Résultats du cas réaliste de la configuration 1 et 2 où q est variable	113

4.3.3.2	Résultats du cas réaliste de la configuration 1 et 2 où q est fixé	114
4.3.3.3	Résultats du cas critique de la configuration 1 et 2 où q est variable	115
4.3.3.4	Résultats du cas critique de la configuration 1 et 2 où q est fixé	115
4.3.3.5	Analyse des résultats	117
4.4	Probabilité de blocage d'appels	117
4.4.1	Stratégie à deux phases	117
4.4.1.1	Résultats obtenus	117
4.4.1.2	Analyse des résultats	120
4.4.2	Stratégie hiérarchique	120
4.4.2.1	Stratégie hiérarchique pour le cas $C_{h1} + C_{h2} \leq C$. .	120
4.4.2.2	Stratégie hiérarchique pour le cas $C_{h1} + C_{h2} \geq C$. .	120
4.4.2.3	Analyse des résultats	123
4.5	Recommandations	124
CHAPITRE 5 CONCLUSION		126
5.1	Contributions du travail présenté dans cette thèse	126
5.2	Suggestions de recherches futures sur le sujet	130
5.2.1	Topologie hiérarchique	130
5.2.2	Modèle dynamique de gestion des handoffs	131
5.2.3	Handoff multi-cellules	131
5.2.4	Handoff multicast	131
5.2.5	Déclenchement du handoff	132
5.2.6	Étude des protocoles ATM PNNI pour la stratégie hiérarchique	132

RÉFÉRENCES 133

ANNEXES 147

LISTE DES FIGURES

Fig. 1.1	Architecture du réseau UMTS	4
Fig. 1.2	Architecture des réseaux ATM sans fil	13
Fig. 1.3	Protocole des réseaux ATM sans fil	14
Fig. 2.1	Évolution du chemin d'une connexion mobile suite à des handoffs à travers 3 macro-cellules : extension de la connexion	31
Fig. 2.2	Évolution du chemin d'une connexion mobile suite à des handoffs à travers 3 macro-cellules : rétablissement complet de la connexion	33
Fig. 2.3	Évolution du chemin d'une connexion mobile suite à des handoffs à travers 3 macro-cellules : rétablissement partiel	35
Fig. 2.4	Évolution du chemin d'une connexion mobile suite à des handoffs à travers 3 macro-cellules utilisant l'arbre de connexions virtuelles	37
Fig. 2.5	Modèle de handoff à deux phases	39
Fig. 2.6	Modèle de handoff hiérarchique	40
Fig. 3.1	Diagramme temporel	53
Fig. 3.2	Probabilité d'état intervenant dans le calcul des probabilités de blocage d'appels de la stratégie à deux phases	76
Fig. 3.3	Probabilité d'état intervenant dans le calcul des probabilités de blocage d'appels de la stratégie hiérarchique dans le cas où $C_{h1} + C_{h2} \leq C$	83
Fig. 3.4	Probabilité d'état intervenant dans le calcul des probabilités de blocage d'appels de la stratégie hiérarchique dans le cas où $C_{h1} + C_{h2} > C$	88

Fig. 4.1	Structure du réseau ATM sans fil	94
Fig. 4.2	$\overline{b_p}/b_{RP}$ et $\overline{b_h}/b_{RP}$ pour le trafic de voix : cas réaliste avec $b/b_{RP} = 0.5$, $\overline{L^r} = \overline{L^p} = 7$, $\overline{L^h} = 3$, $L^{hs} = 240$ et q variable	99
Fig. 4.3	Variation de $\overline{b_p}/b_{RP}$ pour différentes valeurs de q pour le trafic de voix : cas réaliste avec $b/b_{RP} = 0.5$, $\overline{L^r} = \overline{L^p} = 7$, $\overline{L^h} = 3$, $L^{hs} = 240$ et q variable	99
Fig. 4.4	Rapports $\overline{b_p}/\overline{b_h}$ et $\overline{b_s}/\overline{b_h}$ pour le trafic de voix : cas réaliste avec $b/b_{RP} = 0.5$, $\overline{L^r} = \overline{L^p} = 7$, $\overline{L^h} = 3$, $L^{hs} = 240$	101
Fig. 4.5	Rapports $\overline{b_p}/\overline{b_h}$ et $\overline{b_s}/\overline{b_h}$ pour le trafic de voix : cas réaliste avec $b/b_{RP} = 0.8$, $\overline{L^r} = \overline{L^p} = 7$, $\overline{L^h} = 3$, $L^{hs} = 240$	102
Fig. 4.6	Rapports $\overline{b_p}/\overline{b_h}$ et $\overline{b_s}/\overline{b_h}$ pour le trafic de données : cas réaliste avec $b/b_{RP} = 0.5$, $\overline{L^r} = \overline{L^p} = 7$, $\overline{L^h} = 3$, $L^{hs} = 240$	103
Fig. 4.7	Rapports $\overline{b_p}/\overline{b_h}$ et $\overline{b_s}/\overline{b_h}$ pour le trafic de données : cas réaliste avec $b/b_{RP} = 0.58$, $\overline{L^r} = \overline{L^p} = 7$, $\overline{L^h} = 3$, $L^{hs} = 240$	104
Fig. 4.8	Rapports $\overline{b_p}/\overline{b_h}$ et $\overline{b_s}/\overline{b_h}$ pour le trafic de voix, cas q variable : $b/b_{RP} = 0.5$, $\overline{L^r} = \overline{L^p} = 7$, $\overline{L^h} = 1$, $L^{hs} = 60$	108
Fig. 4.9	Rapports $\overline{b_p}/\overline{b_h}$ et $\overline{b_s}/\overline{b_h}$ pour le trafic de voix, cas q variable : $b/b_{RP} = 0.8$, $\overline{L^r} = \overline{L^p} = 7$, $\overline{L^h} = 1$, $L^{hs} = 60$	109
Fig. 4.10	Rapports $\overline{b_p}/\overline{b_h}$ et $\overline{b_s}/\overline{b_h}$ pour le trafic de données, cas q variable : $b/b_{RP} = 0.5$, $\overline{L^r} = \overline{L^p} = 7$, $\overline{L^h} = 1$, $L^{hs} = 60$	110
Fig. 4.11	Rapports $\overline{b_p}/\overline{b_h}$ et $\overline{b_s}/\overline{b_h}$ pour le trafic de données, cas q variable : $b/b_{RP} = 0.8$, $\overline{L^r} = \overline{L^p} = 7$, $\overline{L^h} = 1$, $L^{hs} = 60$	111
Fig. 4.12	Probabilité de blocage de nouveaux appels et des handoffs de la stratégie à deux phases : $C = 50$, $A = 35$ Erlang et $\beta = 0.2$	118

Fig. 4.13	Probabilité de blocage de nouveaux appels et des handoffs des stratégies à deux phases et hiérarchique : $C = 100$, $A = 70$ Erlang et $\beta = 0.25$	119
Fig. 4.14	Probabilité de blocage de nouveaux appels et des handoffs de la stratégie hiérarchique : $C = 50$, $A = 35$ Erlang, $\beta_{h1} = 0.2$, $\beta_{h2} = 0.05$ et $C_{h2} = 34$	121
Fig. 4.15	Probabilité de blocage de nouveaux appels et des handoffs de la stratégie hiérarchique : $C = 100$, $A = 70$ Erlang, $\beta_{h1} = 0.2$, $\beta_{h2} = 0.05$ et $C_{h2} = 68$	121
Fig. I.1	Diagramme temporel	148
Fig. III.1	Diagramme de transition de la stratégie à deux phases	169
Fig. IV.1	Calcul du nombre de handoffs	174

LISTE DES NOTATIONS ET DES SYMBOLES

\bar{x}	La valeur moyenne d'une variable aléatoire x .
A	Trafic total offert.
A_n	Trafic offert de nouveaux appels.
A_h	Trafic offert de handoffs inter-commutateurs.
A_{h1}	Trafic offert de handoffs intra sous-réseaux.
A_{h2}	Trafic offert de handoffs inter sous-réseaux.
b	Largeur de bande requise sur les liens d'une connexion.
b_{EC}	Largeur de bande de la signalisation pour une extension du chemin.
b^h	Largeur de bande par appel de la stratégie hiérarchique.
b^p	Largeur de bande par appel de la stratégie à deux phases.
b_{RP}	Largeur de bande de la signalisation pour un réacheminement partiel.
b^r	Largeur de bande par appel de la stratégie de réacheminement partiel.
C	Nombre de canaux radio d'une cellule.
C_h	Nombre de canaux radio mis en réserve pour les demandes de handoff inter-commutateurs.
C_{h1}	Nombre de canaux radio mis en réserve pour les demandes de handoff intra et inter sous-réseaux.
C_{h2}	Nombre de canaux radio mis en réserve pour les demandes de handoff inter sous-réseaux.
d	Délai de réservation de b sur chaque lien de la connexion.

d_{EC}	Délai de la signalisation pour une extension du chemin.
d^h	Délai par appel de la stratégie de handoff hiérarchique.
d^p	Délai par appel de la stratégie à deux phases.
d_{RP}	Délai de la signalisation pour un réacheminement partiel.
d^r	Délai par appel de la stratégie de réacheminement partiel.
H	Nombre de liaisons entre le commutateur d'origine et le commutateur cible durant une extension du chemin.
L	Nombre de liaisons entre le commutateur auquel est rattaché le terminal et le point-extrémité.
L^h	Nombre de liaisons entre le nœud-racine d'un sous-réseau auquel appartient l'appel et la destination de l'appel.
L^{hs}	Nombre de liaisons dans les sous-réseaux.
L^p	Nombre de liaisons du chemin partiel entre le commutateur de handoff et le commutateur auquel la station de base cible est rattachée pour la stratégie à deux phases.
L^r	Nombre de liaisons du chemin partiel entre le commutateur de handoff et le commutateur auquel la station de base cible est rattachée pour la stratégie de rétablissement partiel.
$P(i, j)$	Probabilité d'état stationnaire d'avoir i nouveaux appels et j appels de handoffs.
$P(i, j, k)$	Probabilité d'état stationnaire avec i nouveaux appels, j handoffs intra sous-réseaux et k handoffs inter sous-réseaux.
$P_{handoff}$	Probabilité de blocage des handoffs inter-commutateurs.
$P_{nouveaux}$	Probabilité de blocage des nouveaux appels.

P_{inter}	Probabilité de blocage des handoffs inter sous-réseaux.
P_{intra}	Probabilité de blocage des handoffs intra sous-réseaux.
P_1	événement intervenant dans le calcul de $P_{nouveaux}$.
P_2	événement intervenant dans le calcul de $P_{handoff}$ ou P_{intra} .
P_3	événement intervenant dans le calcul de P_{inter} .
β	Fraction de trafic de handoff A_h sur le trafic total A .
β_{h1}	Fraction de trafic de handoff intra sous-réseaux A_{h1} sur le trafic total A .
β_{h2}	Fraction de trafic de handoff inter sous-réseaux A_{h2} sur le trafic total A .
q_a	Probabilité qu'un handoff se produise et se termine dans un intervalle.
q_f	Probabilité que l'appel se termine dans un intervalle.
q'_a	Probabilité qu'il y ait un handoff inter sous-réseaux
\bar{n}	Nombre moyen d'intervalles durant un appel.
θ	Fraction de handoff inter sous-réseaux.

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE I	ÉVALUATION DE LA LARGEUR DE BANDE MOYENNE
PAR APPEL	147
I.1 Le handoff à deux phases	149
I.1.1 Largeur de bande utile	149
I.1.2 Largeur de bande de signalisation	152
I.1.3 Largeur de bande totale	153
I.2 Le handoff de réacheminement partiel	155
I.2.1 Largeur de bande de signalisation	156
I.2.2 Largeur de bande utile	156
I.2.3 Largeur de bande totale	159
I.3 Le handoff hiérarchique	160
 ANNEXE II ÉVALUATION DU DÉLAI MOYEN PAR APPEL	 162
II.1 Le handoff à deux phases	163
II.1.1 Délai de signalisation	163
II.1.2 Délai de réservation de largeur de bande utile	163
II.2 Le handoff de réacheminement partiel	165
II.2.1 Délai de signalisation	165
II.2.2 Délai de réservation de la largeur de bande utile	165
II.3 Le handoff hiérarchique	166
 ANNEXE III CALCUL DE LA PROBABILITÉ D'ÉTAT STATIONNAIRE	 168
III.1 Stratégie à deux phases	168
III.2 Stratégie hiérarchique	170

GLOSSAIRE

AAL	ATM Adaptation Layer
ABR	Available Bit Rate
ATM	Asynchronous Transfer Mode
CBR	Constant Bit Rate
CDV	Cell Delay Variation
CDVT	Cell Delay Variation Tolerance
CEPT	Conference of European Postal and Telecommunications
CLR	Cell Loss Rate
CN	Core Network
DLC	Data Link Control
E.164	Standard d'adresses de réseau public
E1	Standard utilisé en Europe pour les transporteurs CEPT
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FEC	Forwarding Equivalent Class
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile communications
IP	Internet Protocol
HIPERLAN	High PErformance Radio Local Area Network
IETF	Internet Engineering Task Force
ISO	International Organization for Standardization

ITU-T	International Telecommunications Union Telecommunications
LLC	Logical Link Control
LSP	Label Switched Path
LSR	Label Switch Router
MAC	Medium Access Control
MBS	Maximum Burst Size
MCR	Minimum Cell Rate
MCTD	Maximum Cell Transfer Delay
MIC	Modulation par Impulsion et Codage
MPLS	MultiProtocol Label Switching
NNI	Network Node Interface
NSAP	Network Service Access Point
PNNI	Private NNI
PVC	Permanent Virtual Circuit
QS	Qualité de Service
T1	Standard utilisé en Amérique du Nord pour les transporteurs CEPT
RFC	Request For Comment
SVC	Switched Virtual Circuit
TCP	Transmission Control Protocol
TM	Terminal Mobile
UBR	Unspecified Bit Rate
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UNI	User Network Interface
UTRAN	UMTS Terrestrial Radio Access Network

VBR-nrt Variable Bit Rate - no real time

VBR-rt Variable Bit Rate - real time

VC Virtual Circuit

VCI Virtual Circuit Identifier

VP Virtual Path

VPI Virtual Path Identifier

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

Depuis les premières liaisons radio et les téléphones conventionnels, en passant par la télévision et en arrivant aux applications sans fil, le monde des télécommunications a toujours évolué pour s'ajuster progressivement aux besoins des utilisateurs.

Récemment, nous avons assisté à la commercialisation de services de communication sans fil et de communication multimédia séparés et, plus récemment, à la mise en œuvre de services combinant les deux modes de communication. Tout cela s'est produit en l'espace d'une décennie et ce n'est pas fini ! Avec l'apparition des technologies de transmission de l'information par paquets, la vitesse de transmission du trafic de données d'un usager mobile peut atteindre 2 mégabits par seconde. La technologie sans fil est devenue aussi envahissante que le téléphone et la télévision.

Selon des études [21, 90] réalisées vers la fin des années 90, l'industrie du sans fil au États-Unis a connu une croissance remarquable. En 1997, elle se chiffrait approximativement à 34 milliards de dollars et a atteint 45,5 milliards de dollars en 1999. En l'an 2000, l'industrie du sans fil continuait sa croissance pour atteindre 52,5 milliards de dollars avec un nombre d'abonnés mobiles qui est passé de 86 à 109,5 millions. Les projections pour l'an 2003 pointent vers une industrie d'environ 100 milliards de dollars soit une croissance approximative de 50% en trois ans.

Devant cette progression phénoménale de l'industrie du sans fil, il devenait impératif pour les bailleurs de fond et les opérateurs du monde des télécommunications

de soutenir cette croissance par le développement de réseaux sans fil capables de satisfaire ce besoin en quantité et en qualité. Un des problèmes auquel ce type de réseaux s'est confronté est la garantie à la fois de la continuité de service et de la mobilité. Ce problème peut se poser aussi bien dans les réseaux de téléphonie que dans les réseaux basés sur les technologies ATM ou IP. Il peut être résolu en définissant une procédure permettant de gérer les handoffs de façon à garantir le niveau nécessaire de qualité de service. Une procédure de handoff peut être exécutée suite au déplacement de l'usager d'une cellule à une autre. Elle peut être gérée au niveau réseau en utilisant des stratégies de réacheminement de la connexion et au niveau accès radio par le biais de stratégies d'allocation de ressources radio.

Dans le cadre de cette thèse, nous proposons d'étudier ce problème pour les réseaux sans fil orientés connexion basés sur la technologie ATM. L'étude présentée dans cette thèse a été inspirée par les nombreux travaux récents sur ce type de réseaux sans fil, par exemple ceux proposés par le forum ATM [26, 40, 44, 47, 86, 108] et ceux publiés dans des journaux [35, 39, 43, 46, 80, 87, 106]. Parmi ces réseaux, on retrouve le réseau Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) et le réseau ATM sans fil. Ces deux réseaux permettent de transporter différents types de trafic avec différentes qualités de service. Ils sont dotés de fonctions de mobilité telles que le handoff et la gestion de la localisation afin de gérer le déplacement des usagers. L'étude sur le handoff présentée dans cette thèse peut s'appliquer à ces deux réseaux. Elle peut aussi se généraliser au réseau IP sans fil qui doit fournir une fonction de gestion des handoffs et assurer la qualité de service pour chacune des connexions mobiles. Malgré le fait que la couche IP fonctionne par datagrammes, il est toutefois possible d'établir une session bout-à-bout par le biais de protocoles des couches supérieures comme TCP. La qualité de service est garantie en utilisant les techniques telles que : Resource ReSerVation Protocol (RSVP), Integrated Services

(IntServ) et Differentiated Services (DiffServ) [7, 12, 14, 15, 17, 16]. Cette étude peut aussi s'appliquer au réseau orienté connexion Multi-Protocol Label Switching (MPLS) dans lequel la qualité de service est assurée par le biais des protocoles DiffServ et IntServ. Cependant, la technique MPLS n'est pas encore définie pour les réseaux sans fil. Les sous-sections qui suivent décrivent le réseau UMTS, la technologie ATM et le réseau ATM sans fil. Elles donnent aussi un bref aperçu sur les réseaux IP et MPLS pour lesquels cette étude pourrait s'appliquer.

1.1 Le réseau UMTS

Les systèmes de troisième génération ont été proposés dans le but de fournir une mobilité globale pour une large gamme d'applications : la téléphonie, la messagerie, l'Internet et la transmission de données large bande. Ces systèmes possèdent plusieurs appellations : l'UMTS, défini par l'organisation ETSI, et International Mobile Telecommunications for the year 2000 : (IMT-2000) défini par l'UIT [2, 3, 4, 18, 89].

Le réseau UMTS comprend 3 parties qui sont interconnectées entre elles : le réseau central (Core Network : (CN)), l'accès radio (UMTS Terrestrial Radio Access Network (UTRAN)) et le terminal mobile (User Equipment : (UE)) (voir figure 1.1).

L'architecture de base du CN est basée sur le Global system for Mobile Communications : (GSM) et le General Packet Radio Service : (GPRS). Les principales fonctions du CN sont la commutation, le routage et le transfert du trafic de l'usager. Il contient aussi différentes fonctions telles que la gestion des appels et la gestion de la mobilité. Le CN peut être soit basé sur la technologie IP soit sur la technologie ATM. Il peut fonctionner en mode commutation de circuits ou commutation

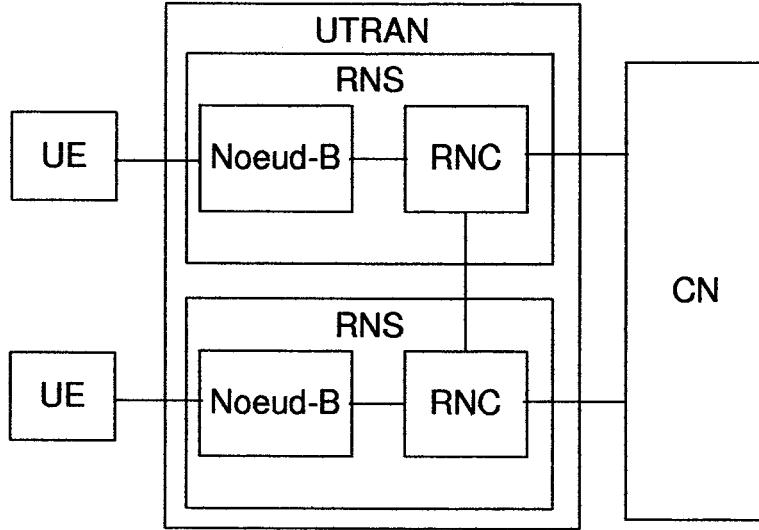


Fig. 1.1 Architecture du réseau UMTS

de paquets. Les éléments de la commutation de circuits sont Mobile Switching Center : (MSC), Visitor Location Register : (VLR) et Gateway MSC. Les éléments de la commutation de paquets sont Serving GPRS Support Node : (SGSN) et Gateway GPRS Support Node : (GGSN). Les éléments tels que Equipment Identity Register : (EIR), Home location Register : (HLR) et Authentication Center : (AUC), reliés à l'identification de l'usager, sont communs aux deux modes de transfert. Pour l'étude de la fonction du handoff dans le réseau UMTS, le CN considéré utilise la technologie ATM (désigné par UMTS/ATM). Dans ce CN, la couche AAL2 est utilisée pour les connexions du type commutation de circuits et la couche AAL5 pour les connexions du type commutation de paquets. Dans un réseau UMTS, il est possible de négocier les caractéristiques d'un service au moment de l'établissement de la connexion et de la renégocier durant une connexion. Des services orientés connexion point-à-point ou point-à-multipoint peuvent être fournis par un réseau UMTS/ATM.

L'UTRAN fournit l'accès radio à l'usager. Il comprend un ou plusieurs sous-systèmes radio (Radio Network Subsystems : (RNSs)), chacun comprenant une Station de base appelée Nœud-B et un contrôleur radio (Radio Network Controller : (RNC)). Le nœud-B gère plusieurs fonctions, comme la transmission et la réception à travers l'interface radio, la modulation/démodulation et le codage dans le canal physique. Le RNC gère le contrôle des ressources radio et des admissions, l'allocation de canaux radio et les handoffs. La transmission des cellules ATM à travers les liens radio n'est pas prévue dans les réseaux UMTS/ATM. Ainsi, les cellules ATM en provenance du CN sont réassemblées en trames au niveau du nœud-B avant d'être transmise au terminal mobile.

Dans l'UMTS, la mobilité est soit ajoutée aux fonctions de l'ATM standard, et donc intégrée dans le CN, soit gérée par un serveur de mobilité (UMTS Mobility Server) déchargeant le CN de quelques services. L'UMTS étant basé sur l'ATM, on propose de donner un aperçu sur cette technologie.

1.2 Le mode de transfert asynchrone

Le mode de transfert asynchrone (Asynchronous Transfer Mode, ATM) est à la fois une technique de multiplexage et de commutation permettant de transporter et de commuter tous les types d'information numérisée aux débits les plus variés. C'est une technique de transfert de l'information par paquets courts appelés cellules, de longueur fixe de 48 octets, plus 5 octets d'en-tête. L'acheminement de ces cellules se fait sur des voies logiques dont la connexion est assurée par le biais d'une identification double. L'en-tête d'une cellule comporte d'une part l'identification de la connexion élémentaire à laquelle appartient la cellule, appelée circuit virtuel (Virtual

Circuit (VC)), d'autre part, celle du groupe de circuit virtuel auquel appartient cette connexion appelée conduit virtuel (Virtual Path (VP)). Ainsi, une connexion ATM est identifiée par un identificateur de circuit virtuel (Virtual Circuit Identifier (VCI)) et par un identificateur de conduit virtuel (Virtual Path Identifier (VPI)). On peut ainsi remplacer une connexion physique entre deux terminaux quelconques, par exemple deux routeurs, par une connexion virtuelle équivalente et multiplexée avec d'autres sur une artère de transmission commune.

On alloue à chaque connexion virtuelle une largeur de bande qui représente le nombre de bits par seconde transmis par cette connexion à travers le lien physique. Différents circuits virtuels peuvent avoir diverses largeurs de bande selon le type de service qu'ils transportent. Généralement, un circuit voix occupe normalement une largeur de bande de 64 kilobits par seconde, en utilisant la technologie de Modulation par Impulsion et Codage (MIC)¹, alors qu'un circuit transportant des données peut se voir allouer une largeur de bande qui varie de 64 kbps jusqu'à plusieurs mégabits par seconde.

Différentes valeurs admissibles de délai de transfert des cellules sont définies par la technologie ATM. Ces délais de transmission sont gérés par la couche d'adaptation ATM (Adaptation ATM Layer (AAL)). Cette dernière doit adapter le mode de transmission de la couche application à celui de la couche ATM. Elle doit assurer une fonction de segmentation du trafic en blocs de 48 octets et de réassemblage des données de l'application. Elle doit résoudre des problèmes de type temporel pour les applications voix et vidéo en utilisant la resynchronisation et le filtrage de la gigue de cellule manifestant une fluctuation aléatoire du temps de transit dû aux

¹On peut envisager, par codage, d'avoir plusieurs voies téléphoniques sur le même circuit de base T1 ou E1.

files d'attente. Elle doit aussi résoudre des problèmes relatifs aux pertes de paquets pour les applications de données en utilisant la correction d'erreurs, la retransmission de cellules et l'élimination de cellules dupliquées.

La technologie ATM définit différents paramètres de trafic et de Qualité de Service (QS). Les paramètres de trafic sont :

- taux maximal de cellules (Peak Cell Rate (PCR)) : définit le taux maximal qui peut être accepté par l'interface ATM ;
- taux moyen de cellules (Sustainable Cell Rate (SCR)) ;
- taille maximale des rafales (Maximum Burst Size (MBS)) : est le nombre de cellules qui peuvent être envoyées en rafales ;
- taux minimal de cellules (Minimum Cell Rate (MCR)) ;
- variation acceptable de la durée de transfert des cellules (Cell Delay Variation Tolerance (CDVT)) ;
- durée acceptable d'une rafale (Burst Tolerance (BT)).

Les paramètres de QS sont :

- taux de perte de cellules (Cell Loss Rate (CLR)) : ce taux est calculé en comparant le nombre de cellules reçues par rapport au nombre de cellules envoyées. C'est un paramètres important dans les réseaux sans fil dû au fait que des pertes peuvent se produire dans le canal radio ;
- variation sur la durée de transit (Cell Delay Variation (CDV)) ;
- taux de cellules mal insérées (Cell Misinsertion Rate (CMR)) ;
- durée maximale de transit des cellules (Maximum Cell Transfer Delay (MCTD)) ;
- durée moyenne de transit des cellules (Mean Cell Transfer Delay (MCTD)) ;
- taux de blocs de cellules erronées (Severely Errored Cell Block Rate (SECBR)) : ce taux représente le nombre de cellules perdues dans chaque bloc de cellules reçu. Il est estimé pour un ensemble S de blocs de cellules consécutifs ou non

- consécutifs en calculant le nombre de cellules perdues dans chaque bloc, en identifiant les blocs de cellules avec plus que M cellules perdues (appelés blocs de cellules erronées) et en divisant le nombre total des ces blocs par S ;
- taux de cellules erronées (Cell Error Rate (CER)) : il consiste à comparer le flux de cellules à la réception avec celui envoyé par la source.

Les paramètres de trafic et de QS sont utilisés pour définir les catégories de service suivantes :

- débit constant (Constant Bit Rate (CBR)) : cette catégorie de service est définie pour les applications d'émulation de circuit tels que $E1$, $T1$, et pour la voix. Elle est définie pour la couche d'adaptation ATM 1 : AAL1 ;
- débit variable-temps réel (Variable Bit Rate-real time (VBR-rt)) : cette catégorie de service est définie pour les applications voix et vidéo en mode connecté, et avec contrainte de temps. Elle est spécifique à la couche d'adaptation ATM 2 : AAL2 ;
- débit variable non-temps réel (Varable Bit Rate-no real time (VBR-nrt)) : cette catégorie de service est définie pour les applications du type données en mode connecté et sans contrainte de temps. On retrouve cette catégorie de services dans la couche d'adaptation ATM 3/4 : AAL3/4 ;
- débit sans garanties (Available Bit Rate (ABR) ou Unspecified Bit Rate (UBR)) : cette catégorie de service est définie pour les applications de données en mode non connecté et sans contrainte de temps. Elle est définie pour la couche d'adaptation ATM 5 : AAL5.

Pour plus de détails sur la couche AAL, nous référons le lecteur aux standards [6, 9, 10, 11, 13]

Ainsi, un réseau ATM fonctionne en mode connecté ; c'est à dire qu'il faut d'abord établir une connexion entre un émetteur et un récepteur et lui affecter un circuit et

un conduit virtuels entre chaque nœud avant de transmettre le trafic. Pour établir cette connexion, le forum ATM et l'UIT-T ont proposé un protocole de signalisation appelé Q.93B, qui est une version modifiée du protocole de signalisation Q.931 des Réseaux Numériques à Intégration de Services (RNIS). Q.93B est devenu par la suite Q.2931 pour l'UIT-T et UNI3.0/3.1/4.0 pour le forum ATM [5, 8, 23].

Le protocole de signalisation Q.2931 permet d'établir trois types de connexions et deux types de voies virtuelles. Il permet établir des connexions unidirectionnelle point-à-point, bidirectionnelle point-à-point, ou uni/bidirectionnelle point-à-multipoint. Il permet aussi d'établir des voies virtuelles dynamiques et des voies virtuelles permanentes. Une voie virtuelle est constituée d'un ensemble de circuits virtuels. Une fois créée, une voie virtuelle dynamique reste ouverte jusqu'à ce que l'usager la termine, ou qu'une défaillance se produise dans le réseau. Une voie virtuelle permanente est automatiquement rétablie suite à une défaillance du réseau.

Pour établir une connexion point-à-point, un émetteur envoie un message SETUP à un récepteur. Ce message spécifie le flot, le type de couche d'adaptation ATM utilisée, la taille maximale du paquet dans le cas de la couche d'adaptation ATM 5 et l'adresse du récepteur. Un message CALL PROCEEDING est envoyé par le réseau accusant ainsi la réception du message SETUP et spécifiant à l'émetteur le circuit et le conduit virtuel de la connexion qui lui sont assignés. Le récepteur est notifié par le réseau suite à la réception d'un message SETUP dont il accuse réception en envoyant un message CALL PROCEEDING. Si le récepteur accepte l'appel, il envoie un message CONNECT au réseau. Le réseau accuse réception du message en envoyant un message CONNECT ACKNOWLEDGE au récepteur et un message CONNECT à l'émetteur complétant ainsi l'établissement de la connexion.

Dans le cas d'une connexion point-à-multipoint, une connexion point-à-point est d'abord établie entre un émetteur et un récepteur puis des récepteurs sont ajoutés en envoyant des messages ADD PARTY. Tous les récepteurs reçoivent le même type de service spécifié dans le flot initial. Un circuit virtuel est libéré en envoyant le message RELEASE dont le réseau accuse réception en envoyant un message RELEASE COMPLETE.

Le protocole de signalisation Q.2931 définit un espace d'adresses utilisé pour désigner de manière unique chaque abonné à un réseau ATM. Il existe trois types d'adresses : Data Country Code (DCC), International Code Designator (ICD) et le format E.164. Chaque adresse ATM est subdivisée en deux parties : celle définie par l'abonné et celle définie par l'opérateur du réseau. Une telle technologie est aussi utilisé par d'autres réseaux sans fil, comme par exemple le réseau ATM sans fil.

1.3 Le réseau ATM sans fil

L'ATM sans fil, auquel nous nous intéressons, utilise une infrastructure fixe basée sur la technologie ATM et un réseau de stations de base radio desservant des usagers mobiles. Chaque station de base permet une couverture radio d'une région géographique appelée cellule². L'ATM standard a été développé pour desservir des usagers fixes. Pour le support d'usagers mobiles, les réseaux ATM fixes doivent se doter de procédures supplémentaires de gestion de mobilité ayant comme fonctions :

- l'enregistrement de la localisation des usagers pour pouvoir suivre l'usager lors de ses déplacements d'une cellule à l'autre [48, 71, 78, 79] ;

²Dans la suite de ce document, le terme cellule fera toujours référence à la zone géographique de couverture d'une station de base. Nous utiliserons le vocable paquet pour représenter la cellule de la technologie ATM

- la gestion du handoff résultant du déplacement d'un usager d'une cellule vers une autre. Son premier objectif est de maintenir la connexion radio de l'usager tout en lui assurant une Qualité de Service (QS) acceptable.

Dans cette étude, nous nous intéressons à la fonction du handoff, un des points cruciaux pour le maintien des connexions mobiles dans les réseaux ATM sans fil. Avant de décrire les différentes stratégies de handoff, nous présentons l'architecture réseau à laquelle elles s'appliquent, mais d'abord donnons un bref historique sur l'ATM sans fil.

1.3.1 Historique de l'ATM sans fil

En 1996, le concept du réseau ATM sans fil était déjà omniprésent. Plusieurs journaux et magazines ont publié des travaux sur les différents aspects de l'ATM sans fil tels l'architecture, les protocoles, le handoff et la gestion de la localisation. Cette grande effervescence autour de l'ATM sans fil a amené deux différents organismes de standardisation, l'ETSI et le forum ATM, à s'intéresser à ce sujet.

L'ETSI est le premier organisme de standards à enclencher une recherche pour la normalisation du multimédia sans fil compatible avec ATM. L'ETSI avait déjà entamé la standardisation de HIPERLAN (High PERformance Radio Local Network) quand le groupe en charge de l'ATM sans fil a débuté la recherche sur ce sujet. En 1997, l'ETSI a créé un projet appelé Broadband Radio Access Network (BRAN) pour développer des systèmes d'accès radio pour différentes bandes de fréquence utilisant le HIPERLAN [1].

Le forum ATM n'est pas un organisme de standards officiel mais il joue un rôle important dans la spécification de l'ATM sans fil dû à la grande participation et

à l'appui de l'industrie. La première contribution du forum ATM à ce sujet a été présentée en avril 1996 par Lou Dellaverson de Motorola, Ray Raychauduri de NEC et Kristian Rauhala de Nokia. Cette spécification décrit plusieurs modèles de configurations allant des terminaux ATM sans fil fixes aux plateformes de commutateurs ATM mobiles [109]. Deux modèles d'architecture de l'ATM sans fil sont considérés par le forum ATM : un modèle intégrant toutes les fonctions de mobilité et de radio dans le commutateur ATM et un modèle d'accès qui décharge le commutateur ATM de quelques fonctions, par exemple le contrôle des ressources radio, pour les intégrer dans le point d'accès [38]. Des travaux sur les fonctions de mobilité, telles que le handoff et la gestion de la localisation, ont aussi été effectués [28, 30, 31, 37, 102]. Cependant, toutes ces activités de recherche sur l'ATM sans fil n'ont toujours pas été officiellement approuvées par le forum ATM.

Le groupe BRAN de l'ETSI travaille en collaboration avec le forum ATM afin de développer une nouvelle spécification pour la couche (OSI) d'accès radio. La nouvelle technologie radio considérera des techniques de modulation qui garantissent la qualité de service et un contrôle d'erreur flexible pour répondre aux exigences de la couche d'application.

1.3.2 Architecture des réseaux ATM sans fil

Un réseau ATM sans fil comprend des terminaux mobiles (*TM*), des stations de base (*SB*) et des commutateurs ATM (voir figure 1.2). Chaque station de base couvre une cellule et communique avec les terminaux mobiles présents dans cette cellule. Un certain nombre de stations de base peuvent être connectées à un même commutateur ATM [65, 66, 85, 88, 103, 104].

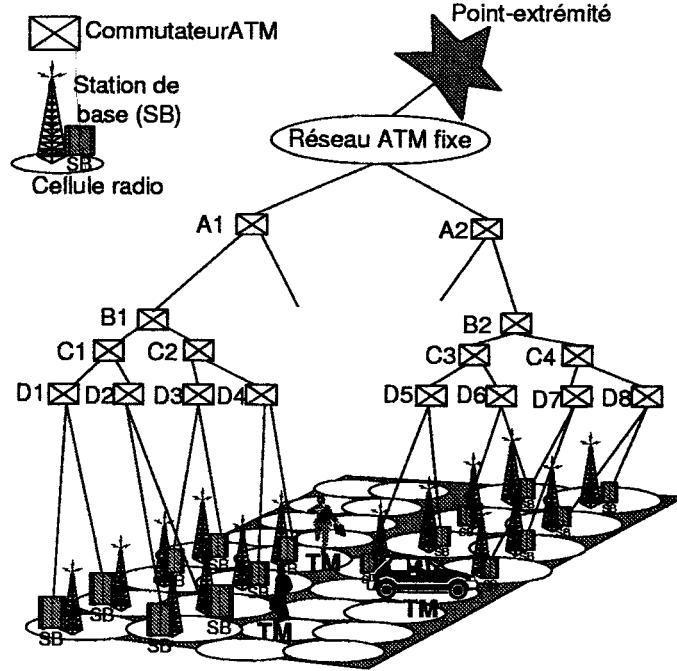


Fig. 1.2 Architecture des réseaux ATM sans fil

Deux types de commutateurs ATM sont disponibles. D'une part, des commutateurs ATM dotés de la fonction de réacheminement de la connexion pouvant gérer les handoffs dits inter-commutateurs entre deux stations de base connectées à des commutateurs ATM différents, par exemple les commutateurs B_1 , B_2 , A_1 et A_2 de la figure 1.2. Ils sont souvent appelés commutateurs de croisement [95, 96, 99, 111] ou commutateurs de handoff [33]. D'autre part, des commutateurs ATM ne possédant pas la fonction de réacheminement de la connexion. Ces commutateurs sont directement connectés aux stations de base, par exemple les commutateurs D_i , $i = 1, \dots, 8$ (figure 1.2). Le type de handoffs qu'ils gèrent est appelé intra-commutateurs. Comme ces derniers ne génèrent aucun trafic de signalisation réseau, ils n'interviennent pas dans les calculs du trafic de signalisation dont traite notre étude.

Comme on peut le voir dans la figure 1.3, le protocole d'un réseau ATM sans fil est composé de deux parties relativement indépendantes. La première partie est une

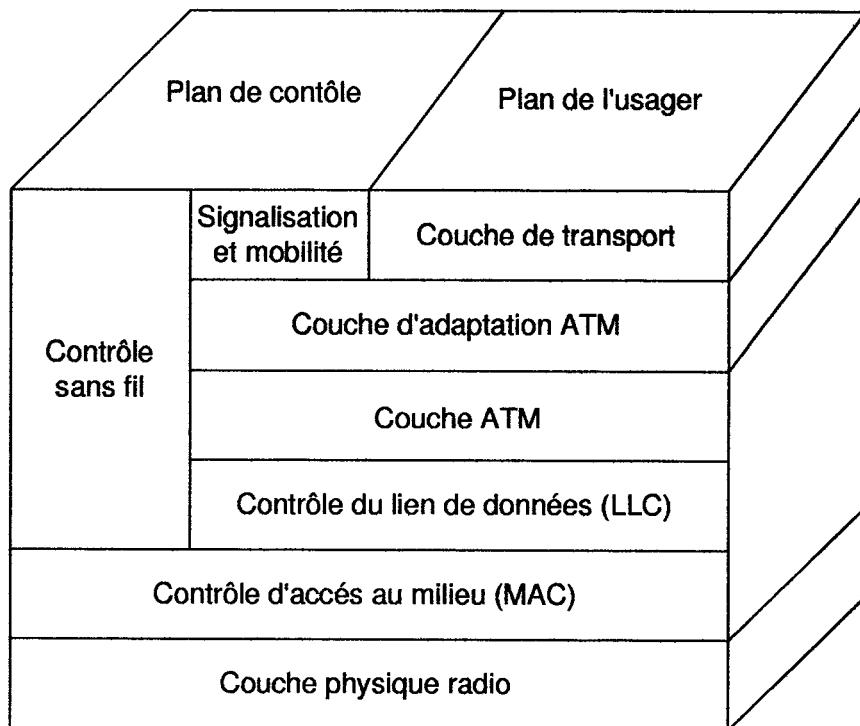


Fig. 1.3 Protocole des réseaux ATM sans fil

infrastructure mobile ATM qui consiste à intégrer des fonctions de mobilité dans le protocole ATM standard. Dans cette structure, le trafic du type commutation de circuits, tel que le trafic voix, est transféré en utilisant la couche AAL1 ou AAL2. Le trafic du type commutation de paquets, tel que le trafic de données, est transféré en utilisant la couche AAL5. La signalisation ATM est utilisée pour les fonctions de contrôle de la connexion de la couche ATM tels que l'établissement d'appel, le contrôle de la QS et le handoff. La deuxième partie est une infrastructure accès radio comprenant :

- une couche physique radio établissant des canaux radio entre l'usager et la station de base ;

- une couche de contrôle d'accès au médium (Medium Access Control ou MAC) pour gérer l'allocation des canaux radio aux terminaux mobiles ;
- une couche de contrôle du lien de données/logique (Data/Logical Link Control : DLC/LLC) pour détecter et corriger les erreurs de transmission radio et maintenir la qualité du service (QS) bout-à-bout ;
- un contrôle sans fil pour gérer des fonctions spécifiques au lien radio tels que le contrôle de la puissance du signal, l'enregistrement initial et l'allocation des ressources radio.

Le trafic usager, la signalisation ATM et le contrôle sans fil sont multiplexés dans un canal radio à travers la couche MAC et la couche physique qui fournit les fonctions de synchronisation, de mise en trame et de modulation.

Ainsi, le réseau UMTS et le réseau ATM sans fil possèdent une architecture similaire comprenant un accès radio et une infrastructure ATM avec support de la mobilité. Ils possèdent aussi les mêmes fonctionnalités qui sont :

- commutation de circuit gérée par une infrastructure ATM ;
- support de plusieurs catégories de services avec garantie de la qualité de service ;
- gestion de la mobilité par l'infrastructure ATM ou par des serveurs de mobilité externes au réseau ATM.

1.4 Le réseau IP sans fil et le réseau MPLS

IP est une technique de routage de paquets de tailles différentes qui sont acheminés à travers un réseau en utilisant l'adresse de destination contenue dans leur entête. Chaque routeur du réseau IP doit consulter sa table de routage pour déterminer le prochain nœud vers lequel les paquets seront transmis. Ainsi, les réseaux IP ne sont

pas des réseaux orientés connexions. Cependant, ils sont capables d'établir une session bout-à-bout par le biais de protocoles tels que le protocole TCP. Ils peuvent être dotés de fonctions de mobilité telles que le handoff et la gestion de la localisation : c'est ce qu'on appelle réseau IP sans fil. Ce type de réseau peut d'une part reconnaître la notion de connexion et d'autre part la notion de qualité de service. Par conséquent, l'étude présentée dans cette thèse peut s'appliquer à ce type de réseau, ce qui représente un exemple de travaux futurs dans ce domaine.

Un autre type de réseau définissant la notion de connexion est le réseau MPLS. Le MPLS est une technique de commutation de paquets utilisant la stratégie d'échange de label (Label Swapping), semblable à la commutation de cellules pour la technologie ATM. Un label est un nombre inséré entre le niveau 3 et le niveau 2 du modèle Open Systems Interconnection (OSI) par les routeurs supportant l'échange de label. Ces derniers commutent les paquets, sur la base de ces labels uniquement, tout au long du réseau jusqu'à la destination sans consulter l'entête IP ou la table de routage. De plus, le MPLS permet d'affecter les paquets IP à des classes de transfert (Forwarding Equivalent classes (FEC)). Les paquets appartenant à une même classe (FEC) suivront le même chemin (Label Switched Path (LSP)) et auront la même méthode de transfert. La classification des paquets s'effectue à l'entrée du réseau MPLS. La technique MPLS est encore à l'étape d'appel aux commentaires (Request For Comments : RFC) [20, 22, 24, 25]. De plus, il existe trois problèmes fondamentaux reliés à l'implémentation de MPLS dans les réseaux [19, 34]. Ces problèmes sont :

- Comment faire la correspondance entre un trafic et une classe FEC ?
- Comment faire la correspondance entre une classe FEC et un LSP ?
- Comment faire la correspondance entre les LSPs et la topologie d'un réseau physique ?

Cependant, advenant que le réseau MPLS sans fil soit défini, appliquer cette étude à ce type de réseau représente un autre exemple de travaux futurs.

1.5 Présentation du problème

Dans ce travail, nous proposons d'étudier la fonction de handoff dans les réseaux sans fil orientés connexions. Dans ce qui suit, nous allons utiliser spécifiquement les réseaux ATM sans fil comme modèle de réseaux orientés connexions afin de décrire plus en détails la gestion d'une telle fonction. Tous les résultats sont en le principe applicables aux autres réseaux sans fil orientés connexions.

Le handoff ATM diffère du handoff voix conventionnel par le fait que l'usager mobile peut maintenir plusieurs connexions actives en même temps, avec des exigences en largeur de bande et des contraintes de qualité de service (QS) différentes. La fonction du handoff doit réacheminer toutes ces connexions à une autre station de base d'une manière continue que possible sans interruption sensible. En d'autres termes, il faut prévenir la perturbation du service et les dégradations durant et après le traitement du handoff. Ceci impose des délais courts pour réaliser un handoff. De plus, pour offrir des débits plus élevés, les réseaux sans fil utilisent des cellules radio de tailles de plus en plus petites. On note alors une croissance importante du trafic de signalisation dans le réseau et, par conséquent, une augmentation de la largeur de bande utilisée pour la signalisation. L'objectif d'un bon protocole de handoff est donc de réduire le délai d'exécution tout en assurant l'efficacité dans l'utilisation des ressources du réseau.

Dans le cas du forward handoff, où un terminal mobile pourrait obtenir un canal radio de la station de base vers laquelle il se déplace, le temps pris pour réacheminer

la connexion dans le réseau doit être le plus court possible pour éviter la perte de la connexion. Ceci nous ramène au problème du choix judicieux du protocole de réacheminement de la connexion. Ce problème est au cœur de notre étude.

Selon le protocole de réacheminement utilisé, les stratégies de handoff peuvent être classées en deux catégories : simple et hybride. Les stratégies simples utilisent un seul protocole de réacheminement [33, 95, 27]. Parmi ces stratégies, on retrouve le réacheminement complet, l'extension de la connexion, le réacheminement partiel et l'arbre de connexions virtuelles. Le réacheminement complet établit un nouveau chemin entre le TM et le point-extrémité (figure 1.2). L'extension de la connexion prolonge le chemin de l'ancienne station de base vers la nouvelle. Le réacheminement partiel permet d'établir une nouvelle portion de connexion entre la nouvelle station de base et le commutateur de handoff. La stratégie de l'arbre de connexions virtuelles est basée sur la réservation de ressources dans l'arbre. Ce dernier est constitué d'un ensemble de commutateurs ATM interconnectés entre eux en arbre dont les feuilles sont les stations de base. Le déplacement de l'usager à travers les stations de base de l'arbre ne nécessite pas de réacheminement de la connexion. On a démontré dans [95] que le modèle de réacheminement partiel permet un délai de handoff faible tout en assurant une gestion de ressources efficace en comparaison avec les autres protocoles simples.

Les stratégies à deux phases comportent deux étapes [70, 105, 110]. Une première étape de réacheminement qui répond rapidement à la demande de handoff est suivie d'une deuxième étape d'optimisation du chemin de la connexion. Il existe essentiellement deux procédures de handoff à deux phases combinant les avantages de deux stratégies de handoff simples. La première combine l'extension du chemin avec le réacheminement partiel. Comme première phase, cette stratégie utilise l'extension

du chemin pour répondre rapidement à la demande de handoff qu'elle fait suivre d'un réacheminement partiel lors de la deuxième phase. La deuxième procédure est basée seulement sur le réacheminement partiel. Cette stratégie exécute un premier réacheminement partiel en réponse à la demande de handoff. Dans ce cas, la rapidité d'exécution du handoff prime sur l'optimisation du chemin qui sera réalisée lors d'un second réacheminement partiel.

1.6 Objectifs de la recherche

Dans cette thèse, nous proposons une nouvelle stratégie de gestion du handoff que nous appelons handoff hiérarchique. L'idée a germé à partir de l'étude de toutes les stratégies de réacheminement de handoff existantes et plus spécifiquement de la stratégie à deux phases. Rappelons que cette stratégie s'exécute en deux étapes : une extension ou un réacheminement de la connexion pour répondre assez rapidement à la demande de handoff suivie d'un réacheminement pour l'optimisation du chemin de la connexion. La stratégie hiérarchique utilise aussi deux stratégies de réacheminement simple mais en une seule et même phase. Comme nous allons le voir, un premier protocole s'applique à une partie du réseau et le second protocole s'applique à la partie complémentaire du même réseau. Il s'agit d'une stratégie qualifiée d'hybride comme la stratégie à deux phases.

L'idée de la stratégie hiérarchique est de combiner la stratégie d'arbre de connexions virtuelles avec la stratégie de réacheminement partiel en les exécutant simultanément. Une connexion mobile est donc constituée d'une portion de chemin appartenant à l'arbre de connexions virtuelles, qui n'engendre pas de délai en cas de handoff, et une seconde portion de chemin, extérieure à l'arbre, où le réacheminement partiel

entraîne un délai d'exécution du handoff. Les messages de signalisation sont utilisés sur une portion de chemin plus courte que celle des stratégies à deux phases et de réacheminement partiel, ce qui réduit le délai de handoff. Même si la stratégie de handoff à deux phases répond assez rapidement aux demandes de handoff, elle demeure une stratégie complexe puisque les deux phases nécessitent toutes les deux de la signalisation. Le délai de handoff pour la stratégie de réacheminement partiel est plus grand que celui de la stratégie hiérarchique. En effet, le réacheminement partiel utilise des messages de signalisation sur un chemin de connexion plus long que celui du chemin utilisé pour le même handoff dans la stratégie hiérarchique.

En contrepartie, la stratégie de handoff hiérarchique est basée sur la réservation de ressources à priori, ce qui peut sembler de prime abord comme un inconvénient. Cependant, les futurs réseaux ATM sans fil seront amenés à desservir des milliers d'usagers mobiles dans des cellules radio de plus en plus petites. Pour ces réseaux, les ressources réservées seraient partagées entre plusieurs usagers mobiles, ce qui devrait permettre de gérer les demandes de handoffs avec moins de signalisation que pour le réacheminement à deux phases ou partiel et compenser la réservation de ressources.

Les objectifs recherchés en proposant la stratégie de handoff hiérarchique visent à satisfaire les critères suivants :

- une largeur de bande de handoff moindre que celle utilisée par les stratégies de handoff à deux phases et de réacheminement partiel ;
- un délai de handoff plus faible que celui des stratégies de handoff à deux phases et de réacheminement partiel.

Afin de compléter l'étude de performance des trois stratégies de handoff, nous proposons aussi d'évaluer la probabilité de blocage d'appels pour ces stratégies en

utilisant la méthode de mise en réserve de canaux radio pour les demandes de handoff. Dans ce cas, compte tenu qu'il existe deux types de handoff pour la stratégie hiérarchique, nous nous proposons d'étudier l'effet de la mise en réserve de canaux sur la probabilité de blocage d'appels.

1.7 Contribution

Compte tenu des objectifs cités plus haut, nous présentons dans cette section les contributions réalisées dans le cadre de ce travail de recherche et qui ont fait l'objet de publications dans trois conférences internationales [57, 58, 59].

1. Analyse de différentes stratégies de gestion du handoff dans les réseaux ATM sans fil. Ces stratégies sont : réacheminement complet, extension de la connexion, réacheminement partiel, arbre de connexions virtuelles et à deux phases [57] ;
2. proposition d'une nouvelle stratégie de gestion du handoff répondant aux besoins des futurs réseaux ATM sans fil. Cette stratégie permettra une meilleure gestion des ressources du réseau et offrira un délai de handoff plus faible que celui des stratégies de handoffs conventionnelles [57, 58, 59] ;
3. introduction de trois critères de performances applicables aux stratégies de handoff hiérarchique, à deux phases et de réacheminement partiel pour l'estimation de la largeur de bande par appel, du délai de handoff par appel et de la probabilité de blocage des appels [58, 59] ;
4. développement de deux modèles d'analyse pour le calcul des critères de performance des stratégies de handoff :
 - un premier modèle analytique de calcul de la largeur de bande et du délai de handoff pour les trois stratégies de handoff [58, 59] ;

- un second modèle analytique de calcul de la probabilité de blocage des nouveaux appels et des demandes de handoff pour les trois stratégies de handoff ;
5. étude comparative des procédures de handoff hiérarchique, à deux phases et de réacheminement partiel. Cette étude est basée sur une analyse numérique des deux critères de performance : la largeur de bande par appel et le délai de handoff par appel ;
 6. recommandations d'utilisation d'une stratégie particulière de handoff selon le type d'usagers mobiles supportés par les réseaux ATM sans fil.

En plus de présenter une nouvelle stratégie de gestion du handoff, notre contribution considère une stratégie de réacheminement et une stratégie d'affectation de canaux jusqu'à présent étudiées séparément dans les travaux sur le handoff. À la lumière de l'analyse numérique, notre contribution se caractérise par la proposition de recommandations d'utilisation de diverses stratégies de handoff adaptées aux caractéristiques des usagers des futurs réseaux ATM sans fil.

1.8 Structure du document

Cette thèse est organisée en cinq chapitres. Le présent chapitre introduit le cadre de notre recherche et la stratégie générale envisagée pour atteindre les objectifs fixés.

Le chapitre 2 décrit les différentes stratégies présentement proposées pour la gestion de la fonction du handoff dans les réseaux ATM. Les avantages et les inconvénients de chacune sont aussi discutés dans ce chapitre. Nous y présentons également la nouvelle approche proposée pour la gestion de la fonction du handoff dans les réseaux ATM appelée handoff hiérarchique.

Dans le chapitre 3, nous analysons les performances de la nouvelle stratégie de gestion du handoff. Cette analyse permet l'évaluation du délai, de la largeur de bande requise et de la probabilité de blocage d'appels de cette stratégie. Ces mêmes critères de performances sont aussi évalués pour les autres procédures de handoffs à deux phases et de réacheminement partiel.

Au chapitre 4, nous présentons les résultats numériques de l'évaluation des critères de performances discutés au chapitre 3. Une étude comparative des différentes stratégies envisagées est aussi présentée dans ce chapitre. À partir de cette étude, nous dressons des recommandations d'utilisation pour chacune de ces stratégies en fonction des caractéristiques des utilisateurs.

Le chapitre 5 termine par quelques remarques conclusives sur l'ensemble du travail effectué dans notre recherche. On y propose aussi une série de sujets possibles dans le cadre de travaux futurs dans le domaine.

CHAPITRE 2

STRATÉGIES DE GESTION DU HANDOFF DANS LES RÉSEAUX ATM MOBILES

Ce chapitre décrit les principales stratégies de gestion du handoff dans les réseaux ATM mobiles. Nous y présentons d'abord les stratégies de handoff dites simples. Nous enchaînons sur les stratégies à deux phases et finalement terminons en présentant la nouvelle stratégie hiérarchique que nous proposons.

Pour les comparer, nous analysons les avantages et les inconvénients de chacune des stratégies classiques de handoff en termes de délai de handoff et de largeur de bande utilisée dans le réseau, et nous les exploitons pour définir la nouvelle stratégie de handoff hiérarchique proposée.

Nous proposons, en plus, de compléter l'analyse relative au handoff hiérarchique en évaluant la probabilité de blocage des appels qui en résulte. Cette dernière est évaluée en supposant un modèle d'allocation des canaux-radio utilisant une mise en réserve de canaux pour les demandes de handoffs.

Le chapitre comprend 5 sections. La section 2.1 présente les différentes stratégies de gestion du handoff. La section 2.2 décrit la procédure d'exécution du handoff. La section 2.3 présente les différentes stratégies de réacheminement simples. La section 2.4 décrit la stratégie de réacheminement à deux phases. La stratégie de réacheminement

hiérarchique est présentée dans la section 2.5. La section 2.6 décrit les modèles d'allocation des canaux-radio existants et plus particulièrement celui qui est proposé pour la stratégie hiérarchique. Finalement, nous concluons dans la section 2.7.

2.1 Stratégies de gestion du handoff

Différentes stratégies de gestion du handoff ont été proposées dans la littérature [27, 33, 68, 84, 95, 105]. De façon générale, leur fonctionnement permet de définir certaines procédures de base.

2.1.1 Initiation du handoff

Il existe deux modèles d'initiation du handoff : backward handoff et forward handoff. Pour le backward handoff, le terminal mobile détecte une dégradation du signal reçu et initialise un handoff vers la nouvelle station de base. Le terminal maintient son lien radio avec l'ancienne station de base tout au long de l'exécution de la procédure de handoff. Il se connecte à la nouvelle station de base une fois la nouvelle connexion établie. Ainsi, le backward handoff initialise le handoff à partir de l'ancienne station de base [101]. Le modèle forward handoff est caractérisé par l'arrivée soudaine du terminal mobile dans une nouvelle station de base. Dans ce cas, la procédure de handoff peut être initialisée seulement si le terminal mobile arrive à se connecter à la nouvelle station de base vers laquelle il envoie un message de handoff. Ce type de handoff se produit quand le terminal mobile perd subitement sa connexion avec l'ancienne station de base suite à des interférences ou un déplacement rapide du terminal, de sorte qu'il n'ait pas assez de temps pour exécuter un backward handoff.

Le backward handoff permet au terminal mobile de choisir la station de base vers laquelle il va se connecter. Au contraire, le forward handoff permet au terminal mobile de se connecter rapidement à une nouvelle station de base sachant que l'ancienne ne peut lui assurer de bonnes conditions de transmission. Comme une interruption soudaine de la connexion peut se produire, l'implémentation des deux procédures est plus adéquate pour un modèle de handoff que le seul support du backward handoff.

2.1.2 Maintien de la continuité du lien radio

Il existe trois stratégies pour le maintien de la continuité du lien radio : soft handoff, seamless handoff et hard handoffs. Dans la stratégie soft handoff, au moins deux chemins et deux flots de trafic sont actifs simultanément. Le terminal mobile est connecté simultanément aux deux stations de base et les deux flots de trafic sont pris en considération par le terminal mobile et le réseau pour récupérer un seul flot d'information [92, 107]. L'ancien flot de trafic est supprimé quand le réseau relaie le flot de trafic au nouveau chemin. Dans la stratégie seamless handoff, un nouveau chemin est établi en parallèle pendant que l'ancien chemin reste en utilisation. Le terminal mobile transmet le flot de trafic sur les deux chemins, mais c'est l'ancien chemin qui est actif. Ce dernier est supprimé lorsque le réseau relaie le flot de trafic au nouveau chemin qui devient alors actif. Au contraire, la stratégie hard handoffs implique que le mobile se connecte à la nouvelle station de base tout en coupant abruptement sa connexion à l'ancienne station de base [92]. Le changement de canal radio peut impliquer une courte interruption de la connexion. Le nouveau chemin est établi d'avance pour que l'interruption soit aussi courte que possible.

2.1.3 Réacheminement de la connexion

Un réacheminement de la connexion peut être exécuté suite à un handoff pour réduire le délai des prochains handoffs et rendre la gestion des ressources plus efficace. Plusieurs stratégies de réacheminement de la connexion existent. Dans ce travail, nous nous intéressons essentiellement aux modèles de réacheminement des connexions dans les réseaux ATM sans fil. Le choix de la stratégie de réacheminement d'une connexion repose sur les critères de performance suivants :

- la rapidité d'exécution de la procédure de handoff, incluant le réacheminement s'il y a lieu, que nous évaluerons par le délai de handoff ;
- l'efficacité du protocole de handoff par rapport à l'utilisation des ressources réseau et que nous évaluerons par la largeur de bande utilisée durant un handoff ;
- la fiabilité de la procédure sera évaluée par la probabilité de blocage des appels, en particulier des demandes de handoff.

Ces critères de performance seront décrits au chapitre 3.

Dans la section 2.2 nous allons décrire les différentes stratégies de réacheminement qui existent ainsi que la stratégie de réacheminement hiérarchique. Mais d'abord, décrivons les messages de signalisation nécessaire à l'implémentation de telles stratégies. Ces messages viennent s'ajouter à ceux du protocole de signalisation Q.2931 utilisés par ATM.

2.2 Exécution du handoff

De manière générale, les principales étapes d'une stratégie de réacheminement de la connexion sont :

- sélectionner un commutateur qui va établir la nouvelle portion du chemin ;
- changer la route du trafic de l'ancienne portion de connexion vers la nouvelle portion ;
- prolonger la nouvelle connexion du nouveau port radio vers le terminal mobile qui se trouve actuellement dans l'aire géographique couverte par ce port radio.

Ces étapes de réacheminement sont exécutées à l'intérieur de la procédure de handoff en utilisant les messages de signalisation : handoff request, handoff response, handoff confirm, handoff confirm complete, handoff join et handoff join complete.

2.2.1 Handoff request

Un terminal mobile initialise un handoff en envoyant un message handoff request au port radio auquel il est attaché ou au port radio cible. Ce message inclut un identificateur de la connexion (Global Connection Identifier (GCID)) pour identifier la connexion spécifique pour laquelle la procédure du handoff doit être exécutée [28]. Le GCID contient les adresses ATM des deux points-extrémités, en plus d'une paire additionnelle d'identificateurs pour faire la distinction des connexions multiples entre la même paire de points-extrémités.

2.2.2 Handoff response

Le port radio auquel le terminal mobile est attaché indique à ce dernier qu'un chemin partiel de la connexion a été établi vers le port radio cible. Ce message inclut le GCID de la connexion. Durant la phase de transmission des messages handoff request et handoff response, le terminal mobile continue de recevoir et de transmettre le trafic via le port radio auquel il est attaché.

2.2.3 Handoff confirm

Le terminal mobile confirme au port radio qu'il est prêt à se connecter au port radio cible pour la connexion identifiée par le GCID. À cet instant, le terminal mobile arrête de transmettre le trafic au port radio. Le message handoff confirm est envoyé jusqu'au commutateur chargé du handoff, lequel relaie le trafic au nouveau chemin partiel.

2.2.4 Handoff confirm complete

Lorsque le message handoff confirm arrive au port radio cible, l'ancienne portion de la connexion, entre l'ancien port radio et le commutateur de handoff, est libérée. Le message handoff confirm complete est envoyé au terminal mobile lui indiquant qu'il peut commuter vers le nouveau port radio.

2.2.5 Handoff join

Une fois que le terminal mobile a reçu le message handoff confirm complete pour chacune de ses connexions, il raccorde sa fréquence radio à celle du nouveau port. Il envoie alors un message handoff join au nouveau port radio pour chacune de ses connexions.

2.2.6 Handoff join complete

Le port radio informe le terminal mobile du numéro du VC à utiliser sur le nouveau lien. À partir de là, le terminal mobile peut commencer à transmettre et à envoyer le trafic à travers le nouveau port radio.

2.3 Stratégies de réacheminement simples

Plusieurs stratégies de handoff de ce type ont été proposées et étudiées et l'implantation de quelques unes d'entre elles a même été proposée [27, 29, 33, 36, 68, 81, 95, 99, 110, 101, 115, 117]. Les plus significatives sont décrites dans les sections qui suivent.

2.3.1 Extension de la connexion

Dans la stratégie d'extension de la connexion suite à un handoff, une connexion mobile est prolongée de l'ancienne station de base vers la nouvelle station de base à travers le réseau fixe. Cette extension de chemin peut être réalisée soit par l'ancienne station de base, comme le montre la figure 2.1, soit par un commutateur ATM.

Les commutateurs auxquels l'ancienne station de base et la nouvelle station de base sont connectées sont souvent appelés commutateur d'origine et commutateur cible. Ce sont respectivement les commutateurs *B*, *C* et *D* illustrés dans la figure 2.1 qui illustre comment la méthode d'extension du chemin prolonge la connexion du commutateur d'origine vers le commutateur-cible durant le handoff [33, 110]. Prenons par exemple le cas où le terminal mobile se trouve dans la station de base *SB1*

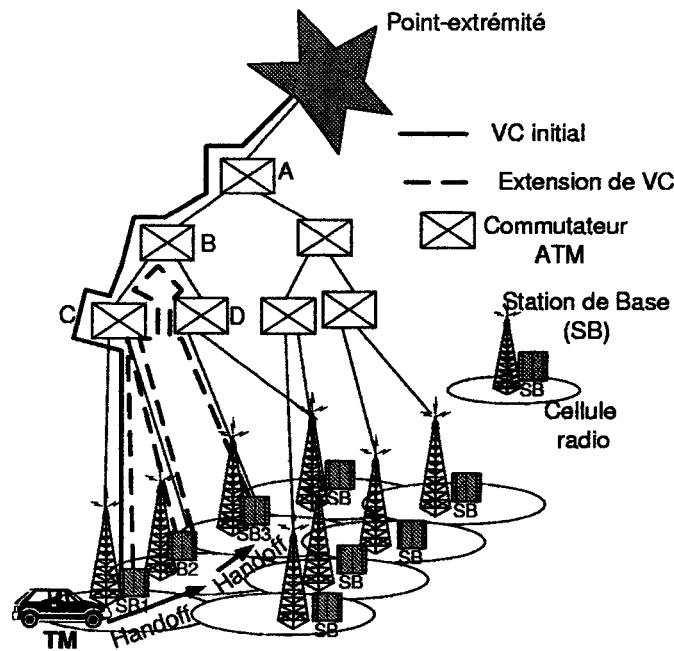


Fig. 2.1 Évolution du chemin d'une connexion mobile suite à des handoffs à travers 3 macro-cellules : extension de la connexion

(figure 2.1). Le chemin de connexion entre lui et le point-extrémité passe par la chaîne A, B, C de commutateurs et par la station de base $SB1$: c'est ce que l'on va appeler connexion d'origine du TM. Lorsque le TM se déplace vers la station de base $SB2$, le chemin de la connexion d'origine est prolongé de la station de base $SB1$ vers la connexion $SB2$ en passant par le commutateur C . Ainsi, la connexion entre le TM et le point-extrémité passe par la chaîne A, B, C de commutateurs, et par $SB1$, le commutateur C et $SB2$. Si le TM se déplace vers la station de base $SB3$ alors la connexion d'origine passera par la chaîne A, B, C de commutateurs, et par la station de base $BS1$, le commutateur C , la station de base $BS2$, la chaîne C, B, D de commutateurs et par la station de base $SB3$.

Ainsi, pour le passage de la station de base 1 (*SB1*) à la station de base 3 (*SB3*), le chemin entre le mobile et l'autre extrémité passera par la chaîne *C, B, D* de commutateurs et les stations de base *SB1*, *SB2* et *SB3*. Le chemin initial est donc simplement prolongé vers le nouveau commutateur-cible.

L'extension de chemin est en général rapide et simple à mettre en oeuvre. Comme la nouvelle connexion composée de la connexion d'origine prolongée par le chemin étendu est plus longue que la connexion d'origine, les exigences en terme de délai de handoff et de largeur de bande par appel sont difficilement garanties pour les prochains handoffs [68, 110]. En effet, plus le nombre de handoffs augmente, plus la nouvelle connexion est longue, exigeant plus de largeur de bande et un plus long délai. De plus, quand l'usager mobile se déplace dans une aire limitée, des boucles fermées peuvent se produire sur une connexion du fait de la possibilité que l'usager revienne dans une cellule déjà visitée.

En conclusion, malgré la simplicité de déploiement et la rapidité de réponse à la demande de handoff, il apparaît que cette méthode est difficilement utilisable dans les réseaux à grande mobilité et à grande couverture géographique.

2.3.2 Rétablissement complet

Comme son nom l'indique, la stratégie de rétablissement complet de la connexion établit un nouveau chemin entre la nouvelle station de base et le point-extrémité. La figure 2.2 illustre l'évolution du chemin d'une connexion d'un terminal mobile qui se déplace à travers trois macro-cellules dans un réseau adoptant l'approche de rétablissement complet de la connexion. À partir de cette figure, nous pouvons voir que quand le terminal mobile se trouve dans la zone de la station de base *SB1*, le

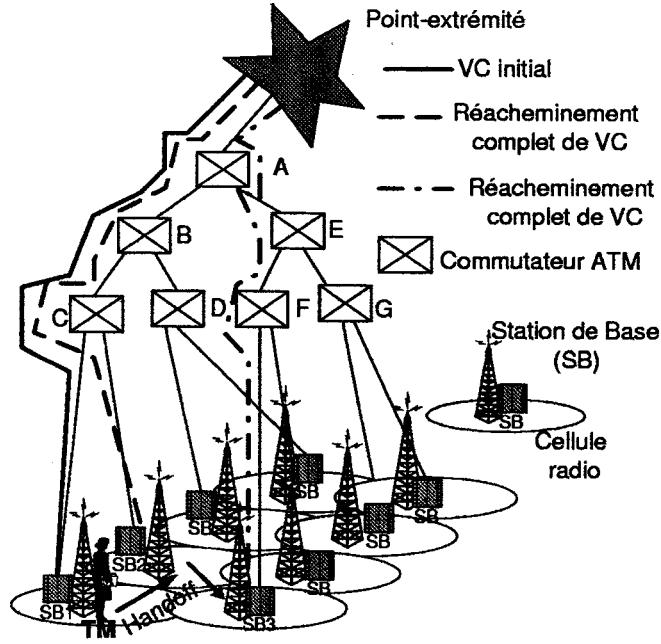


Fig. 2.2 Évolution du chemin d'une connexion mobile suite à des handoffs à travers 3 macro-cellules : rétablissement complet de la connexion

chemin de connexion entre lui et le point-extrémité passe par la chaîne A, B, C de commutateurs et par $SB1$. Quand le TM se déplace vers $SB2$, un rétablissement complet du chemin est établi passant par la chaîne A, B, C de commutateurs et par $SB2$. Si le mobile se déplace vers $SB3$, un nouveau chemin est établi passant par chaîne A, E, D de commutateurs et par $SB3$.

Cette stratégie de handoff a un impact mineur sur l'architecture du réseau fixe. Cependant, elle peut entraîner des délais de handoff importants pouvant causer la fin brusque d'une connexion. De plus, l'usager mobile et le point-extrémité auquel le mobile est connecté doivent être impliqués dans l'opération de rétablissement du chemin.

2.3.3 Rétablissement partiel

Dans cette approche, une connexion partielle est établie de la nouvelle station de base vers un nœud résidant sur le chemin de la connexion d'origine entre l'ancienne station de base et le point-extrémité. Un exemple de réacheminement partiel est illustré dans la figure 2.3. Dans cet exemple, la connexion d'origine entre le TM et le point-extrémité passe par la chaîne A, B, C de commutateurs et par la station de base $SB1$. Suite au déplacement du TM vers $SB2$, la portion de chemin entre le commutateur C et $SB1$ est remplacée par la portion de chemin entre le commutateur C et $SB2$. Si un handoff vers $SB3$ se produit, alors la portion de connexion passant par la chaîne A, B, C de commutateurs et $SB2$ est remplacée par la nouvelle portion de chemin passant par la chaîne A, E, F de commutateurs et par $SB3$ (voir figure 2.3).

Cette technique est intéressante car elle exige uniquement l'établissement d'un nouveau chemin partiel, sans impliquer le point extrémité, lequel est relié à une portion du chemin de connexion d'origine [32, 61, 81, 95, 96, 97, 98, 99, 100]. On peut imaginer que le point extrémité ne perçoit pas le handoff réseau comme une interruption de service. Suite à un handoff de la station de base $BS1$ vers la station de base $BS2$, le chemin qui passe par la chaîne A, B, C de commutateurs est fixe (voir figure 2.3). Le nouveau chemin établi est donc plus court que dans le cas de l'extension simple du chemin de la figure 2.1.

À chaque handoff, on établit le chemin optimal en terme du nombre minimal de liens, évitant ainsi la perte de ressources. On s'attend à ce que cette procédure soit rapide et efficace. Cependant, elle nécessite un certain trafic de signalisation et l'activation d'une procédure de détermination du commutateur de handoff qui permet d'établir la nouvelle portion de chemin de la connexion.

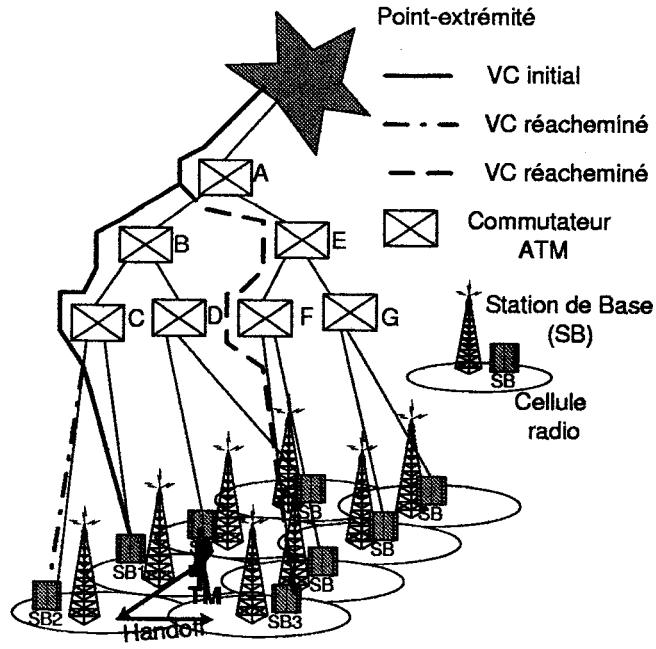


Fig. 2.3 Évolution du chemin d'une connexion mobile suite à des handoffs à travers 3 macro-cellules : rétablissement partiel

Le réacheminement partiel du chemin peut être considéré comme une généralisation du modèle d'extension du chemin. Lors de l'extension du chemin, l'ancien commutateur prolonge la connexion d'origine vers le commutateur-cible alors que, dans le réacheminement partiel, un commutateur appartenant à la connexion d'origine peut être sélectionné pour établir une branche de la connexion vers le commutateur cible [33, 68, 110]. Un exemple de protocole de signalisation pour le réacheminement partiel, appelé modèle d'Akyol et Cox, est décrit dans [33]. On y présente une étude permettant d'estimer le nombre de messages et la largeur de bande de signalisation qui en résulte.

Le réacheminement partiel du chemin permet, en principe, de créer un chemin optimal en termes de délai de handoff et de largeur de bande utilisée. Mais le temps

nécessaire pour déterminer la position du commutateur de handoff et établir la nouvelle branche de la connexion mobile peut dépasser le délai maximal admissible pour le handoff [68, 70, 110, 112], ce qui en limite l'utilité.

2.3.4 Arbre de connexions virtuelles

On propose, dans [27], une méthode appelée arbre de connexions virtuelles où les cellules et les commutateurs ATM sont regroupés dans un arbre dont la racine est un commutateur ATM et les feuilles sont les stations de base (voir figure 2.4). Dans cet arbre, les ressources sont pré-allouées de sorte qu'aucun trafic de signalisation n'est nécessaire lorsqu'un mobile se déplace à l'intérieur des cellules couvertes par l'arbre, par exemple, le déplacement du TM de *SB1* vers *SB2*. Quand un mobile se déplace en dehors de la région couverte par l'arbre, un handoff inter-arbres se produit. À ce moment, le processus d'appel du réseau entre en fonction pour transférer l'appel vers l'arbre de connexions virtuelles approprié [27].

L'inconvénient d'un tel concept est l'établissement de connexions multiples permanentes alors qu'une seule sera éventuellement utilisée, ce qui réduit l'efficacité d'utilisation de la largeur de bande du réseau. Cependant, comme nous le démontrerons ultérieurement, dans le cadre de la stratégie hiérarchique, cette réservation de ressources n'est pas aussi inefficace qu'il paraît. En effet, le fait que ce concept ne nécessite pas de trafic de signalisation mérite d'être étudié et approfondi. Avant de présenter la nouvelle procédure de handoff de ce type que nous proposons, nous décrirons les stratégies à deux phases.

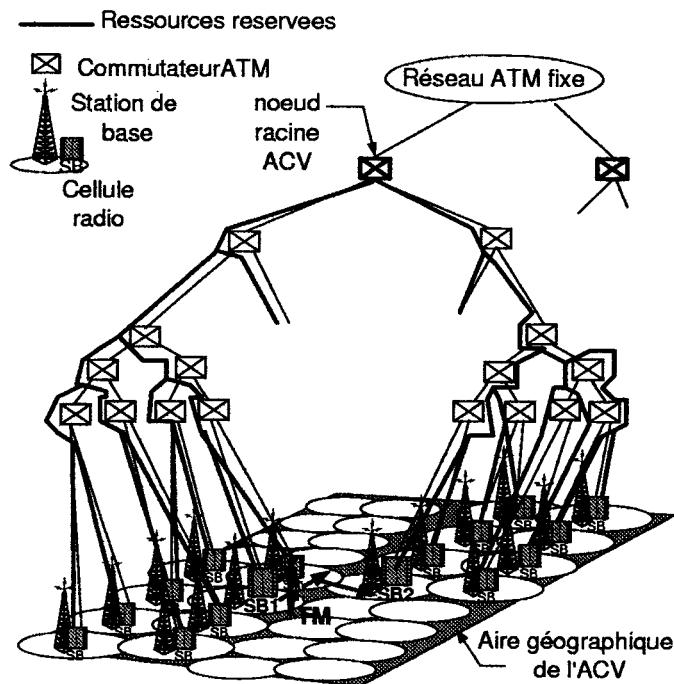


Fig. 2.4 Évolution du chemin d'une connexion mobile suite à des handoffs à travers 3 macro-cellules utilisant l'arbre de connexions virtuelles

2.4 Stratégies de réacheminement à deux phases

D'autres concepts de handoffs, appelés stratégies à deux phases, ont été proposés dans [68, 70, 105, 110, 112]. Ces stratégies peuvent utiliser soit l'extension du chemin, soit le réacheminement partiel pour traiter une demande de handoff immédiatement, ce qui constitue la phase 1. La phase 2 qui suit consiste en un réacheminement partiel pour réduire le nombre de liens du chemin. Comme le montre la figure 2.5, lorsque le mobile passe de la station de base *SB1* à la station de base *SB2*, une nouvelle portion de chemin qui passe par *SB1*, le commutateur *C* et *SB2* vient s'ajouter à la connexion d'origine laquelle passe par la chaîne *A, B, C* de commutateurs et *SB1*. Un second handoff vers *SB3* implique un deuxième prolongement de la connexion passant par *SB2*, la chaîne *C, B, D* de commutateurs et *SB3*. Ainsi, le chemin prolongé passe par *SB1*, le commutateur *C*, *SB2*, la chaîne *C, B, D* de commutateurs et *SB3*. Pour

réduire ce chemin, une optimisation du chemin est exécutée créant un chemin partiel qui passe par la chaîne A, B, D de commutateurs et $SB3$. Ainsi, cette deuxième phase permet d'établir un chemin partiel plus court et, par conséquent, une connexion entre le TM et le point-extrémité optimale en terme de nombre de liens.

L'avantage des handoffs à deux phases est que l'extension ou le réacheminement partiel de la phase 1 assurent une réponse rapide à la demande de handoff. D'autre part, le réacheminement partiel de la phase 2 permet une réduction du coût du chemin en terme de largeur de bande et de délai de handoff. On remarque que le réacheminement partiel prend place pendant la communication d'un terminal mobile à travers le chemin prolongé via la station de base actuelle.

Du fait que les méthodes à deux phases utilisent une extension ou un réacheminement partiel du chemin suivi d'un réacheminement partiel, le coût en largeur de bande résultant peut être élevé. De plus, le handoff nécessite un délai d'exécution non négligeable, puisqu'il faut d'abord prolonger ou réacheminer la connexion avant de procéder à une optimisation du chemin. Afin de pallier les problèmes de délai et de largeur de bande présents dans toutes les méthodes courantes, nous avons proposé dans [57] une nouvelle stratégie de handoff appelée handoff hiérarchique. Cette stratégie est une procédure hybride utilisant, à la fois, l'arbre de connexions virtuelles et le réacheminement partiel.

2.5 Stratégie de handoff hiérarchique

Nous introduisons à ce point la nouvelle stratégie qui utilise le concept d'arbre de connexions virtuelles en formant des regroupements de cellules. Plus spécifiquement, les stations de base sont regroupées en arbres, eux-mêmes regroupés en arborescence

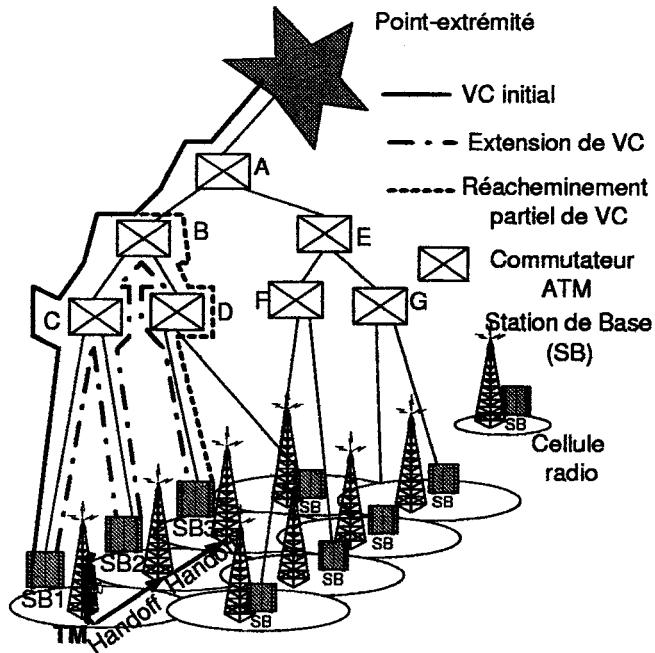


Fig. 2.5 Modèle de handoff à deux phases

à un nœud-racine. La caractéristique fondamentale de ces arbres tient au fait que toutes les ressources nécessaires pour effectuer un handoff à l'intérieur de l'arbre sont réservées à l'avance. Dans ce cas, nous devons distinguer deux types de handoffs : les handoffs intra sous-réseaux et les handoffs inter sous-réseaux. Un handoff intra sous-réseaux est géré par les nœuds-racines des différents arbres composant le sous-réseau. Pour ce type de handoff, il n'y a pas de délai puisque toutes les ressources sont disponibles. Par exemple, dans la figure 2.6, le handoff (P_1, P_2) de $SB1$ vers $SB2$ se produit à l'intérieur de l'arbre de nœud-racine C : c'est un handoff intra sous-réseau. En ce qui concerne les handoffs inter sous-réseaux, ils sont gérés par le réseau en utilisant un réacheminement partiel entre les racines des deux arbres impliqués. A titre d'exemple, le handoff (P_5, P_6) entre $SB5$ et $SB6$ sur la figure 2.6 est un handoff inter sous-réseaux. Ce handoff nécessite un réacheminement de l'appel

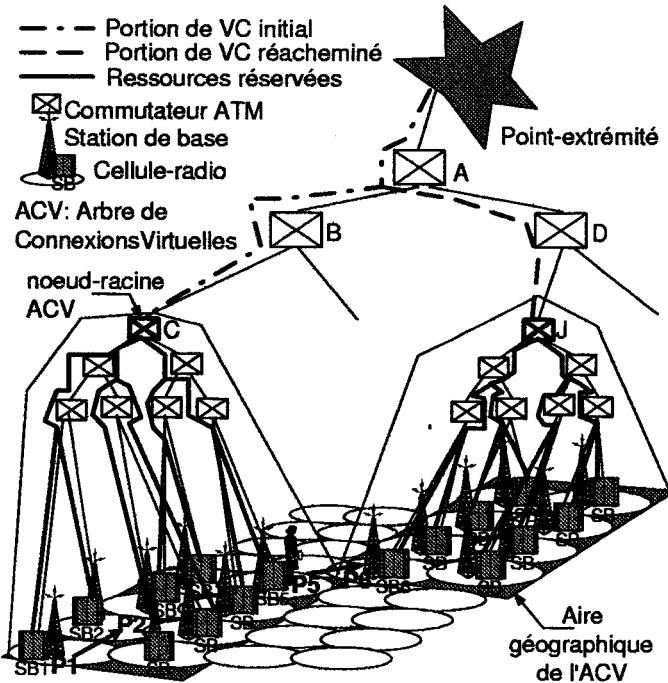


Fig. 2.6 Modèle de handoff hiérarchique

entre les nœuds-racines C et J par le biais du nœud-racine commun A . En effet, la connexion d'origine entre le TM dans $SB5$ et le point-extrémité passe par la chaîne A, B, C de commutateurs et par les commutateurs de l'arbre de connexions virtuelles contenant $SB5$. Suite à un handoff vers $SB6$, un nouveau chemin est établi passant par la chaîne A, D, J de commutateurs et l'arbre de connexions virtuelles contenant $SB6$.

Cette stratégie de handoff permet une gestion distribuée de la mobilité puisque chaque nœud-racine d'un arbre peut gérer la mobilité pour un ensemble de stations de base indépendamment des autres nœuds-racines. Ceci réduit la durée de traitement des demandes de handoff et permet l'utilisation de commutateurs de gestion de mobilité aux nœuds-racines de moindre coût que dans le cas où un seul arbre serait utilisé sur l'ensemble du réseau.

L'utilisation de sous-réseaux ayant une structure d'arbre où les ressources sont réservées à l'avance permet aussi de réduire le trafic de signalisation, ce qui est important dans le cas de réseaux multimédia. En effet, en diminuant le trafic de signalisation, il est possible de réduire le délai dû à l'exécution des demandes de handoff ainsi que la largeur de bande utilisée pour la signalisation. Cependant, la réservation de ressources entraîne une augmentation de la largeur de bande réseau utilisée. Par conséquent, il devient impératif, pour fin de comparaison avec d'autres stratégies, d'évaluer la performance d'une telle stratégie en terme de durée d'exécution de handoff et de largeur de bande utilisée et de déterminer dans quelle situation il y a lieu d'utiliser une stratégie plutôt qu'une autre.

La largeur de bande de signalisation requise par la stratégie hiérarchique est plus faible que pour les techniques à deux phases et de réacheminement partiel, car le réacheminement partiel de la stratégie hiérarchique s'applique à une portion de chemin plus courte. La largeur de bande utilisée par un usager est plus élevée car, même si l'usager n'utilise qu'une seule connexion, plusieurs autres connexions doivent être réservées. Vu sous cet angle, il est clair que la largeur de bande du handoff hiérarchique est de loin plus importante que celle utilisée pour les handoffs de réacheminement partiel ou à deux phases. Cependant, dans le cadre des futurs réseaux ATM sans fil multimédia, utilisant des cellules-radios de plus en plus petites, il est à prévoir une augmentation des requêtes de handoffs. Dans ce contexte, nous évaluons non pas la largeur de bande utilisée par un seul usager ou un seul handoff mais par plusieurs usagers ou handoffs se partageant la largeur de bande réservée dans le réseau. Ainsi, nous pouvons supposer que la largeur de bande du handoff hiérarchique pourrait ne pas dépasser celle requise par des handoffs utilisant une procédure à deux phases ou de réacheminement partiel.

En conclusion, nous pouvons d'ores et déjà envisager que la stratégie hiérarchique pourrait procurer les avantages suivants :

1. un temps d'exécution du handoff réduit par rapport à celui du handoff de réacheminement partiel simple, du fait que l'arbre de connexions virtuelles n'impose aucun délai d'exécution du handoff et que le réacheminement partiel est appliqué sur un chemin de connexion plus court ;
2. une gestion des ressources du réseau plus efficace que la stratégie d'arbre de connexions virtuelles simple, puisque ce dernier utilise une réservation de ressources plus importante que la stratégie hiérarchique.

Il nous reste par contre à démontrer nos attentes vis-à-vis la stratégie hiérarchique, qui pourrait :

- permettre une gestion des ressources du réseau plus efficace que les stratégies de handoff à deux phases et de réacheminement partiel ;
- conduire à des délais de handoff plus faibles que les stratégies de handoff à deux phases et de réacheminement partiel.

Ces questions seront abordées dans le chapitre 3 en évaluant et en comparant la largeur de bande et le délai de handoff des trois stratégies : à deux phases, de réacheminement partiel et hiérarchique.

Pour évaluer les performances de la stratégie hiérarchique, nous allons considérer des réseaux ATM sans fil multi-services formés à partir de la superposition de deux réseaux mono-service : voix et données. Dans ce cas, chaque lien entre deux commutateurs d'un arbre de connexions virtuelles est configuré pour supporter les deux types de trafic. Le trafic de la voix est transféré à travers une interface ATM configurée avec AAL1 et le trafic de données à travers une interface ATM configurée avec AAL5. Pour le trafic de la voix, la catégorie de service CBR peut être choisie. Ce trafic est

transféré avec un taux inférieur ou, au plus, égal au taux maximal de cellules (PCR) et avec un taux de perte de cellules (CLR), une tolérance sur la variation de délai (CDV), et une durée de transit de cellules (CTD) spécifique à l'application. Le trafic de données est transféré en utilisant la catégorie de service VBR-nrt ou ABR/UBR. Pour un trafic VBr-nrt, les paramètres de trafic PCR, SCR et MBS sont spécifiés. Pour un trafic ABR, les paramètres de trafic PCR et MCR sont spécifiés par l'application alors que pour un trafic UBR, seul le paramètre de trafic PCR est défini. Pour les trafic VBR-nrt et ABR, seul le paramètre de qualité de service CLR est spécifié par l'application. Pour un trafic UBR, aucun paramètre de qualité de service n'est défini.

La réservation de ressources dans l'arbre de connexions virtuelles doit satisfaire les contraintes de chaque type de trafic véhiculé. Dans cet arbre où la fonction de mobilité est absente dans les commutateurs ATM, des interfaces ATM User to Network Interface (UNI) et Network to Network Interface (NNI) standards, sans le support du handoff, peuvent être utilisées. Par conséquent, une grande flexibilité de services peut être garantie avec différents débits et différentes contraintes de transfert des trafics. Par contre, pour les stratégies à deux phases et de réacheminement partiel, cette flexibilité de service est moindre dû au support de la mobilité. Cependant, les interfaces NNI¹ ou Private Network to Network Interface (PNNI)² hiérarchique qui n'appartiennent pas aux sous-réseaux doivent fournir des fonctions de mobilité pour gérer les handoffs inter sous-réseaux.

Nous proposons de compléter cette étude en évaluant la probabilité de blocage des nouveaux appels et des demandes de handoff. Une stratégie d'allocation de canaux

¹Les interfaces NNI sont utilisées quand les sous-réseaux font partie d'un même réseau public.

²Les interfaces PNNI sont considérées quand les arbres sont des réseaux privés interconnectés par un réseau public.

sera utilisée pour évaluer cette probabilité. La section qui suit introduit brièvement les différentes méthodes d'allocation de canaux radio que l'on peut envisager.

2.6 Allocation de canaux radio

Le blocage d'appels est une des mesures de performance parmi les plus significatives des réseaux sans fil. Il faut en particulier bien contrôler le blocage d'appels lors de demandes de handoff, résultant dans l'interruption d'une communication au milieu d'une conversation, particulièrement désagréable pour les usagers. Pour cela, plusieurs chercheurs se sont penchés sur le problème d'allocation des canaux radio et son impact sur la qualité de service qui est définie comme la probabilité de blocage de nouveaux appels et des appels de handoff.

On retrouve deux types de stratégies d'allocation de ressources³ du réseau, avec ou sans la mise en réservation de canaux. D'autre part, l'affectation de canaux peut être fixe ou dynamique, avec ou sans mise en attente des appels. Pour plus de détails sur ces stratégies, nous référons le lecteur à [41, 42, 60, 64, 67, 69, 72, 73, 77, 82, 83, 92, 113, 114, 119, 120].

Les études comparatives faites sur les procédures d'allocation de canaux radio avec ou sans la mise en réserve, et avec ou sans attente, ont révélé que la mise en réserve de canaux permet, en général, de réduire la probabilité de blocage des demandes de handoff. De plus, une amélioration est possible si les demandes de handoffs peuvent être mises en attente [52, 53, 91, 93, 94, 116, 119, 120].

³Une ressource radio peut être une fréquence radio, un intervalle de temps dans une trame ou un code

Nous proposons d'appliquer la stratégie de la mise en réserve statique sans file d'attente pour le modèle hiérarchique. Les raisons d'un tel choix sont les suivantes :

- simplifier le modèle d'allocation de canaux radio pour pouvoir traiter simultanément les différentes procédures de gestion de handoff;
- mesurer l'effet de la mise en réserve de canaux pour les handoffs intra et inter sous-réseaux sur la probabilité de blocage au niveau des handoffs et des nouveaux d'appels.

Le modèle d'allocation de canaux sans file d'attente des stratégies de handoff à deux phases et de réacheminement partiel proposé met en réserve C_h canaux parmi les C canaux d'une cellule. Les nouveaux appels sont bloqués lorsque $C - C_h$ canaux sont occupés par de nouveaux appels. Les demandes de handoff sont bloquées quand tous les canaux d'une cellule sont utilisés. Un appel bloqué est un appel perdu.

Pour le modèle hiérarchique, deux paramètres sont définis : C_{h1} et C_{h2} . Ils permettent de limiter le nombre de nouveaux appels et le nombre de handoffs intra sous-réseaux comme suit :

- les nouveaux appels sont bloqués lorsque leur nombre atteint la valeur $C - C_{h1}$;
- les handoffs intra sous-réseaux sont bloqués quand leur nombre atteint la valeur $C - C_{h2}$;
- les handoffs inter sous-réseaux sont bloqués quand tous les canaux sont occupés.

À partir de ce modèle d'allocation des canaux radio, nous évaluons dans la section 4.4 la probabilité de blocage d'appels pour les trois stratégies de handoff hiérarchique, à deux phases et de réacheminement partiel.

2.7 Conclusion

Diverses stratégies de gestion des handoffs ont été proposées dans la littérature. Certaines permettent d'améliorer la qualité du service au niveau du délai de handoff et de la largeur de bande utilisée, d'autres au niveau de la probabilité de blocage d'appels.

De nombreuses études ont été consacrées aux stratégies de réacheminement de la connexion. Parmi les plus simples, le concept de réacheminement partiel a été le plus exploité, vu qu'il permet une gestion efficace des ressources du réseau et conduit à un délai de handoff plus faible que les autres procédures de handoff simples. Les plus récents travaux ont proposé de combiner les avantages de certaines méthodes simples pour améliorer l'efficacité des stratégies de handoffs. Les méthodes à deux phases, combinant les stratégies d'extension de chemin et de réacheminement partiel ou deux réacheminements partiels, ont été proposées pour réduire le délai de handoff et la largeur de bande par rapport à ceux des stratégies simples. L'analyse de toutes ces procédures de handoffs nous a amené à proposer une nouvelle stratégie basée sur l'arbre de connexions virtuelles et le réacheminement partiel. Nous prévoyons pour cette stratégie un délai de handoff et une largeur de bande plus faibles que ceux des stratégies de handoff à deux phases et de réacheminement partiel.

D'autres travaux se sont intéressés aux stratégies d'allocation des canaux radio et à la qualité de service mesurée par la probabilité de blocage d'appels. Parmi les stratégies proposées, la méthode de mise en réserve de canaux permet de réduire la probabilité de blocage d'appels par rapport à celle de la méthode sans mise en réservation de canaux. Nous avons choisi d'appliquer la méthode de mise en réserve

de canaux radio aux stratégies de handoff hiérarchique, à deux phases et de réacheminement partiel pour évaluer la probabilité de blocage de chacune de ces stratégies.

Dans ce qui suit, nous proposons d'évaluer les largeurs de bande, les délais et la probabilité de blocage d'appels des trois stratégies de handoff. Ces trois mesures seront utilisées comme critères d'évaluation de performance des handoffs.

CHAPITRE 3

ÉVALUATION DES MESURES DE PERFORMANCE

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous proposons des modèles de calcul de la valeur moyenne de la largeur de bande, du délai et de la probabilité de blocage pour les stratégies : hiérarchique, à deux phases et de réacheminement partiel. Nous étudierons ici deux modèles analytiques distincts, l'un pour le calcul de la largeur de bande et du délai de handoff [58, 59], l'autre pour le calcul de la probabilité de blocage d'appels.

Pourquoi deux modèles différents ? Parce que la largeur de bande et le délai de handoff se mesurent au niveau du réseau. Ils dépendent du type de signalisation et du nombre de liens d'une connexion. Ce nombre est variable dans le cas des réseaux mobiles. La probabilité de blocage, par contre, s'évalue au niveau radio. Dans ce cas, le nombre de canaux alloués à chaque type d'appels est variable et dépend de la stratégie d'allocation des ressources radio et du nombre total de canaux disponibles dans une cellule.

La suite de ce chapitre est organisée en 4 sections. La section 3.2 définit les trois critères de performance de la fonction du handoff, notamment la largeur de bande, le délai, et la probabilité de blocage d'appels. La section 3.3 décrit le modèle de calcul de la largeur de bande et du délai de handoff pour les stratégies à deux phases, de

réacheminement partiel et hiérarchique. Finalement, dans la section 3.4 nous présentons le modèle de calcul de la probabilité de blocage d'appels pour ces mêmes stratégies et concluons dans la section 3.5.

3.2 Mesures de performance

Un élément crucial de la bonne gestion des réseaux mobiles est lié à l'implantation d'une stratégie de handoff rapide et efficace, spécialement dans le cas des réseaux à fréquence élevée de handoffs. Pour fins d'évaluation, nous utiliserons essentiellement trois mesures de performance d'une stratégie de handoff dans les réseaux ATM mobiles :

- la largeur de bande moyenne utilisée par une connexion pendant toute sa durée ;
- le délai de handoff ;
- la probabilité de blocage d'appels.

Ces mesures sont importantes pour évaluer la qualité de service d'une connexion.

Nous savons que pour les réseaux mobiles présents et futurs, le nombre d'usagers est en perpétuelle croissance. Ceci nécessite une stratégie de handoff assurant une gestion efficace de la largeur de bande.

Nous savons aussi qu'un mobile déclenche un handoff lorsque le niveau de réception radio atteint un seuil en deçà duquel il y aura perte de communication. Dans ce cas, une stratégie de handoff doit assurer un délai assez court pour que le mobile soit capable de se reconnecter sur un nouveau canal sans détection de la part de l'utilisateur.

De plus, comme il en est d'une façon générale dans tout réseau, bloquer un nouvel appel qui tente de se connecter est un effet indésirable. Cependant, bloquer une demande de handoff est encore plus indésirable du fait que le mobile est déjà en communication. Ainsi, une stratégie de handoff doit assurer un faible taux de blocage d'appels durant le handoff pour garantir une communication fiable à l'usager.

3.2.1 Largeur de bande

Cette mesure de performance représente la quantité de ressources réseau utilisées par la connexion mobile pendant toute sa durée et dépend de deux facteurs. D'une part, de la signalisation qui utilise une certaine largeur de bande lors du transport des différents messages de signalisation ; d'autre part, de la connexion qui utilise la largeur de bande dite utile sur chacun de ses liens pour transmettre le signal d'information.

Contrairement aux réseaux fixes, où la longueur d'une connexion et sa largeur de bande sont fixes pendant toute la durée d'un appel, ces paramètres varient de façon aléatoire dans les réseaux mobiles. Ainsi, suite à un handoff, le chemin de la connexion mobile change et peut être plus long ou plus court que la connexion originale. Ce changement de connexion implique, en général, une augmentation de la largeur de bande requise due à la signalisation et à l'augmentation du nombre de liens de la connexion.

3.2.2 Délai du handoff

On définit généralement le délai du handoff comme le temps écoulé entre le début du handoff et le moment où le flux de trafic de l'usager revient à la normale. Il est

fonction du type de signalisation utilisée ainsi que du nombre de liens de la connexion mobile. En effet, les messages de signalisation doivent d'abord être interprétés par le terminal mobile, par l'ancienne et la nouvelle station de base et par le commutateur de handoff. Ils doivent ensuite être transmis avec des temps de propagation non négligeables sur tous les liens de la connexion mobile, l'ancienne connexion ainsi que la nouvelle portion de connexion. À ce délai s'ajoute le temps nécessaire pour réservrer les ressources sur les différents liens composant la nouvelle portion du chemin de connexion. Le délai d'une demande de handoff est donc le temps requis pour la réservation des ressources sur le nouveau chemin, suite à l'extension ou au réacheminement, en plus du temps requis pour la signalisation. Ce dernier comprend le temps nécessaire pour la transmission et l'interprétation des messages de signalisation.

3.2.3 Probabilité de blocage

Dans le cas des réseaux mobiles, on définit deux événements de blocage s'appliquant respectivement aux nouveaux appels et aux demandes de handoffs. Ils sont définis comme les événements tels qu'un nouvel appel ou qu'une demande de handoff ne puisse trouver un canal radio libre. La probabilité de blocage des demandes de handoff est particulièrement importante car elle s'applique à un appel déjà en communication, et le bloquer peut signifier une interruption au milieu d'une communication. Le nombre de canaux alloués à chaque type d'appel est une entité variable qui dépend d'une part de la stratégie d'allocation des ressources supportées et d'autre part du nombre total de canaux radio alloués à une cellule.

En résumé, nous avons introduit dans le contexte de l'ATM mobile le délai du handoff et la largeur de bande. Tous deux dépendent de la signalisation et du nombre

de liens de la connexion mobile. Ce sont des mesures de performance au niveau réseau. De plus, la mobilité suggère d'introduire des mesures supplémentaires telles que les valeurs de la probabilité de blocage. Ces valeurs dépendent du nombre et du type d'allocation de canaux radio dans une cellule. Ce sont des mesures au niveau radio.

Dans ce qui suit, nous introduisons les modèles de calcul de ces trois mesures de performance. Le premier modèle s'applique à l'évaluation du délai de handoff et de la largeur de bande. Le second permet de calculer les valeurs de la probabilité de blocage des appels.

3.3 Calcul de la largeur de bande et du délai

3.3.1 Hypothèses

De façon générale, durant chaque handoff, un réacheminement de la connexion est nécessaire pour maintenir ou améliorer la qualité de l'appel. Ce réacheminement utilise des messages de signalisation et implique un changement dans le nombre de liens qui composent la connexion mobile.

Rappelons à ce point que les trois stratégies de handoff, à deux phases, de rétablissement partiel et hiérarchique, que nous étudions ici sont toutes basées sur un réacheminement partiel du lien de connexion, ce qui conduit à effectuer les opérations suivantes :

- déterminer le commutateur de handoff,
- établir une nouvelle connexion,
- transférer l'information usager de l'ancienne vers la nouvelle connexion,
- éliminer l'ancienne connexion.

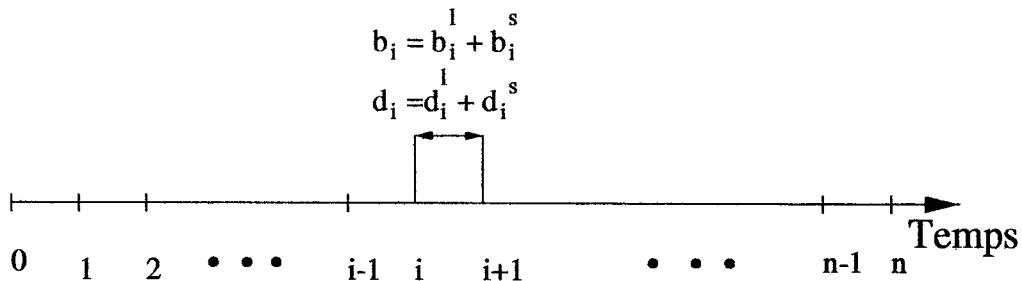


Fig. 3.1 Diagramme temporel

De plus, la stratégie à deux phases utilise une signalisation supplémentaire pour établir la portion de chemin qui prolonge la connexion mobile de l'ancienne station de base vers la nouvelle.

Chaque connexion mobile subit un certain nombre de handoffs pendant toute sa durée. Pour fins de modélisation, cette dernière est subdivisée en n intervalles de temps assez petits pour pouvoir considérer le fait qu'un seul handoff peut se produire et se terminer pendant cet intervalle. À chaque intervalle de temps, on définit :

- q_a la probabilité qu'un handoff se produise et se termine dans cet intervalle ;
- q_f la probabilité que l'appel se termine dans cet intervalle.

Afin de simplifier le modèle de calcul, plusieurs analystes de trafic ont supposé que la durée de séjour dans une cellule suit une distribution exponentielle [53, 54, 64, 92, 114, 118]. Cette hypothèse dépend en fait de la forme de la cellule radio et des distributions spécifiques de la vitesse et de la direction du mobile. Par exemple, Hong et Rappaport [53] supposent que la cellule est de forme hexagonale ou circulaire. Ils supposent aussi que le mobile se déplace dans n'importe quelle direction avec la même probabilité, et que sa direction reste constante durant son déplacement dans la cellule. En réalité, les cellules radio des réseaux mobiles sont de formes quelconques. De plus, la vitesse et la direction du mobile sont difficiles à caractériser. Pour ce type de réseaux mobiles, des travaux ont montré qu'une distribution exponentielle pour la durée de

séjour n'est pas appropriée [49, 51, 56, 74]. Ils proposent de la remplacer par des distributions complexes, par exemple Lognormal, Hyperexponentiel et HyperErlang, nécessitant l'identification de plusieurs paramètres reliés au modèle du trafic choisi. Dans le cadre de cette étude, pour simplifier le calcul de la largeur de bande moyenne et du délai moyen par appel, nous considérons que le temps entre les demandes de handoffs suit une distribution géométrique de moyenne $1/q_a$ ¹.

De même, la durée de l'appel suit une distribution géométrique de moyenne $1/q_f$ ¹. Cette hypothèse est valide pour le trafic voix.

Pour le trafic de données, plusieurs travaux de recherche [45, 50, 55, 62, 76] ont démontré que les périodes de congestion persistantes avec des pertes de paquets non négligeable ne permettent pas de modéliser le trafic TCP avec un modèle de Poisson. En effet, une augmentation des tailles des mémoires tampon ne conduit pas à de grande diminutions des taux de pertes de paquets ; et qu'une petite augmentation du nombre de connexions actives peut conduire à une grande augmentation du taux de perte de paquets. Dans [62, 76], on démontre que les processus Self-Similar sont de meilleurs modèles pour modéliser le trafic TCP que le modèle exponentiel. Cependant, dans le cadre de cette étude, nous nous intéressons à l'arrivée des sessions TELENET et FTP plutôt à la génération de paquets à l'intérieur des ces sessions. Ces arrivées peuvent être modélisées par un processus de Poisson [76]. Ainsi, l'hypothèse faite sur la durée de l'appel est aussi valide pour le trafic de données.

Le diagramme de la figure 3.1 sera utilisé pour calculer la largeur de bande moyenne et le délai moyen par appel. Ce modèle à temps discret que nous considérons est une généralisation de celui proposé dans [110]. C'est un modèle général

¹Les moyennes temporelles correspondantes s'obtiennent en multipliant $1/q_a$ et $1/q_f$ par la durée des intervalles.

car il permet non seulement de calculer la largeur de bande moyenne par appel, mais aussi le délai moyen par appel et ceci pour les trois stratégies de handoff. Pour comprendre le mécanisme de modélisation, nous l'illustrerons en prenant pour exemple celui de la largeur de bande. De façon générale, on suppose implicitement que toutes les connexions ont la même largeur de bande utile. Nous définissons alors les variables suivantes durant l'intervalle de temps $[i, i + 1]$:

- b_i^l la largeur de bande utilisée par la connexion ;
- b_i^s la largeur de bande liée à la signalisation ;
- b_i la largeur de bande totale utilisée par l'appel.

Les deux variables b_i^l et b_i^s sont aléatoires puisqu'elles dépendent de l'apparition ou non d'un handoff dans l'intervalle $[i, i + 1]$ ainsi que de l'optimisation qui peut en résulter.

La variable b_i^l peut prendre deux valeurs. En effet, si l'appel subit un handoff dans l'intervalle $[i, i + 1]$, b_i^l représente la somme de la largeur de bande allouée le long du chemin original et celle allouée sur la nouvelle portion de chemin résultant d'un réacheminement. Dans le cas contraire, elle représente la largeur de bande utilisée par la connexion originale.

De même, si la connexion subit un handoff dans l'intervalle $[i, i + 1]$, b_i représente la largeur de bande utilisée par la connexion, plus la largeur de bande nécessaire à la signalisation. Dans le cas contraire, cette quantité représente simplement la largeur de bande allouée à la connexion. La moyenne de b_i sur les événements de handoffs s'évalue comme :

$$E[b_i] = E[b_i^l] + E[b_i^s]. \quad (3.1)$$

Pour un nombre n fixé d'intervalles, la largeur de bande totale moyenne $b(n)$ utilisée par un appel durant les n intervalles de temps est donnée par :

$$b(n) = b^l(n) + b^s(n) \quad (3.2)$$

$$b^l(n) = \sum_{i=0}^{n-1} E[b_i^l] \quad (3.3)$$

$$b^s(n) = \sum_{i=0}^{n-1} E[b_i^s]. \quad (3.4)$$

Comme le nombre n d'intervalles est une variable aléatoire, il faut maintenant calculer la largeur de bande moyenne \bar{b} sur toutes les durées d'appels tel que $n = 1, \dots, \infty$. Avec nos hypothèses, la probabilité qu'un appel dure n périodes est définie comme $P(n)$:

$$P(n) = q_f(1 - q_f)^{n-1} \quad n = 1, 2, \dots \quad (3.5)$$

de sorte que $\bar{n} = \sum_{n=1}^{\infty} nP(n) = \sum_{n=1}^{\infty} nq_f(1 - q_f)^{n-1} = q_f \sum_{n=1}^{\infty} n(1 - q_f)^{n-1} = 1/q_f$ représente la durée moyenne d'un appel exprimée en nombre moyen d'intervalles. On obtient alors

$$\begin{aligned} \bar{b} &= \bar{b^l} + \bar{b^s} = \sum_{n=1}^{\infty} [b^l(n) + b^s(n)] P(n) \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} b^l(n)P(n) + \sum_{n=1}^{\infty} b^s(n)P(n). \end{aligned} \quad (3.6)$$

Soit $E[b_i^x]$, $x \in \{s, l\}$, une variable qui désigne l'entité $E[b_i^l]$ ou $E[b_i^s]$. Dans les calculs de largeurs de bande donnés plus loin, $E[b_i^x]$ peut être constante ou variable durant un appel. Si elle est variable, on obtient :

$$\bar{b^x} = \sum_{n=1}^{\infty} b^x(n)P(n) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{i=0}^{n-1} E[b_i^x]P(n)$$

$$= q_f \sum_{n=1}^{\infty} (1 - q_f)^{(n-1)} \sum_{i=1}^{n-1} E[b_i^x]. \quad (3.7)$$

Alors que si $E[b_i^x]$ est constante, on a simplement :

$$\begin{aligned} \bar{b}^x &= \sum_{n=1}^{\infty} b^x(n)P(n) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{i=0}^{n-1} E[b_i^x]P(n) \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} E[b_i^x] \sum_{i=0}^{n-1} P(n) = E[b_i^x] \sum_{n=1}^{\infty} nP(n) \\ &= q_f E[b_i^x] \sum_{n=1}^{\infty} n(1 - q_f)^{(n-1)} = \frac{E[b_i^x]}{q_f}. \end{aligned} \quad (3.8)$$

Pour calculer le délai de handoff, la même procédure s'applique en substituant à la variable b la variable d qui représente le délai.

Dans les sous-sections qui suivent, nous évaluons ces mesures pour chacune des stratégies envisagées : à deux phases, réacheminement partiel et hiérarchique.

3.3.2 Stratégie à deux phases

Le protocole de handoff à deux phases comporte en premier lieu une extension suivie d'une optimisation. Un tel protocole permet en général de réduire le nombre de liens d'une connexion. Cependant, on doit établir deux chemins, un pour l'extension et l'autre pour l'optimisation. Ces deux chemins nécessitent l'exécution de deux protocoles de signalisation ainsi que la réservation de ressources sur les deux portions de connexion prolongée et réacheminée. Lorsqu'on l'applique à un grand nombre de connexions mobiles, une telle procédure devient complexe et peut conduire à une utilisation inefficace des ressources réseaux.

Comme palliatif, on propose dans [111] d'optimiser le chemin non pas après chaque extension, mais plutôt à des instants de temps soit fixés, soit choisis aléatoirement. Cette optimisation peut donc être basée soit sur l'utilisation d'un compteur temporel, soit sur le handoff lui-même.

Les méthodes basées sur l'utilisation d'un compteur temporel peuvent utiliser un modèle périodique où l'optimisation s'exécute toutes les T unités de temps. Elles peuvent aussi utiliser un compteur temporel aléatoire dont la durée est modélisée par une variable aléatoire à distribution exponentielle de moyenne $1/\nu$. Pour ces modèles, l'optimisation se déclenche sans prendre en considération le fait qu'un handoff s'est produit ou non.

En ce qui concerne la méthode basée sur le handoff, l'optimisation est déclenchée pour chaque connexion mobile en se basant sur certains paramètres tels que le nombre de handoffs déjà survenus, la vitesse du terminal mobile, etc. On introduit dans cette méthode [110] la probabilité q que l'optimisation soit exécutée après chaque extension du chemin. Ainsi, pour $q = 0$ la méthode à deux phases se réduit à une simple extension alors que pour $q = 1$ le réacheminement partiel est exécuté après chaque extension du chemin.

L'étude comparative de ces méthodes d'optimisation est réalisée dans [110], où on utilise la largeur de bande par appel comme critère de performance. Elle révèle que le modèle basé sur le handoff conduit à une largeur de bande moyenne par appel plus faible comparée aux valeurs estimées pour les modèles périodique et aléatoire. C'est pourquoi nous proposons dans cette thèse de généraliser la méthode basée sur le handoff pour évaluer la largeur de bande et le délai du handoff par appel des stratégies hiérarchique et de réacheminement partiel.

Dans [110], la mesure de performance relative à \bar{b} représente la largeur de bande utilisée par le trafic usager ainsi que les largeurs de bande liées à tous les évènements de handoffs qui se sont produits pendant la durée de l'appel. Pour calculer cette largeur de bande ainsi que le délai de la stratégie à deux phases, nous utilisons le modèle décrit dans la sous-section 3.3.1.

Pour chaque connexion mobile, les évènements suivants peuvent se produire dans chaque intervalle de temps $[i, i + 1]$:

1. extension du chemin dû à un handoff inter-commutateurs ;
2. réacheminement partiel ;
3. fin d'un appel.

À chaque intervalle $[i, i + 1]$, nous définissons :

- L_i le nombre de liaisons entre le commutateur auquel est rattaché le terminal mobile et le point-extrémité. Sur la figure 2.5, $L_i = 3$ pour un mobile rattaché au commutateur C ;
- L_i^p le nombre de liaisons du chemin partiel entre le commutateur de handoff et le commutateur auquel la station de base cible est rattachée. Sur la figure 2.5, $L_i^p = 1$ pour le chemin partiel entre le commutateur B et D ;
- H_i le nombre de liaisons entre la station de base originale et la station de base cible durant l'extension du chemin. Sur l'exemple de la figure 2.5, $H_i = 2$ en considérant l'extension du chemin de $SB1$ vers $SB2$.

En général, les variables aléatoires L_i , L_i^p et H_i dépendent de façon très complexe des évènements de handoff avant l'instant i . Cependant, dans un but de simplification et pour pouvoir poursuivre, nous supposons que ces variables sont indépendantes de i . Cette hypothèse reste cependant raisonnable du fait qu'on peut s'attendre à ce que les chemins occupés par une connexion ainsi que les réacheminements et les

extensions ne varient pas beaucoup d'un handoff à l'autre. Nous remplacerons alors ces variables aléatoires par leurs moyennes \bar{L} , \bar{L}^p et \bar{H} .

On suppose qu'un handoff inter-commutateurs, et donc une extension du chemin, est exécuté avec une probabilité q_a , et que l'optimisation du chemin est exécutée avec une probabilité q après chaque extension. À chaque intervalle de temps i , on définit les deux indicateurs de variables aléatoires

$$I_i = \begin{cases} 1 & \text{si une extension a lieu dans }]i, i + 1] \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.9)$$

$$J_i = \begin{cases} 1 & \text{s'il y a optimisation dans }]i, i + 1] \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.10)$$

de sorte que $E[I_i] = q_a$, et $E[J_i] = q$.

3.3.2.1 Largeur de bande par appel de la stratégie à deux phases

Nous introduisons les paramètres suivants qui sont en général fixés par l'opérateur :

- b est la largeur de bande requise par appel sur les liens L_i (par exemple, pour un appel voix $b = 64$ kbps) ;
- b_{RP} est la largeur de bande requise par la signalisation pour chaque réacheminement partiel ;
- b_{EC} est la largeur de bande requise par la signalisation pour chaque extension du chemin.

Le paramètre b_{RP} inclut la largeur de bande utilisée pour (1) la localisation du commutateur de handoffs, (2) l'établissement de la nouvelle portion de la connexion, (3) la restitution de l'ancienne portion de la connexion et (4) la mise à jour du statut

de l'acheminement existant par le serveur de la connexion. Le paramètre b_{EC} représente la largeur de bande utilisée pour établir le chemin étendu entre le commutateur d'origine et le commutateur-cible.

La largeur de bande moyenne par appel peut être calculée à partir de l'équation 3.6. Pour l'évaluer, nous avons besoin de déterminer $E[b_i^l]$ et $E[b_i^s]$.

Nous calculons tout d'abord la largeur de bande d'une connexion mobile dans l'intervalle de temps $[i, i + 1]$, qui est donnée par :

$$b_i^l = b_{i-1}^l(1 - I_i) + (b_{i-1}^l + H_i b)I_i(1 - J_i) + L_i b I_i J_i. \quad (3.11)$$

On réfère le lecteur à l'annexe I, équation I.4.

En évaluant la moyenne de cette largeur de bande sur les événements de handoffs nous obtenons :

$$E[b_i^l] = (1 - q_a q)E[b_{i-1}^l] + q_a[(1 - q)\bar{H} + q\bar{L}]b. \quad (3.12)$$

L'évaluation de $E[b_i^l]$ est obtenue par récurrence en partant de la valeur initiale $E[b_0^l] = \bar{L}b$. Du fait que la variable $E[b_i^l]$ obtenue est fonction de i , nous utilisons l'équation 3.7 pour évaluer la valeur moyenne de la largeur de bande d'une connexion mobile. En se référant à l'équation I.26, on obtient :

$$\bar{b}^l = \frac{\bar{L}}{q_f}b + \frac{q_a(1 - q)(1 - q_f)\bar{H}}{q_f[1 - (1 - q_a q)(1 - q_f)]}b. \quad (3.13)$$

Nous calculons maintenant la largeur de bande de signalisation due à la mobilité à l'instant i , qui est donnée par :

$$b_i^s = I_i(b_{EC} + J_i b_{RP}) \quad i \geq 1. \quad (3.14)$$

La moyenne de b_i^s sur les évènements de handoffs est donnée par :

$$E[b_i^s] = q_a(b_{EC} + q b_{RP}) \quad i \geq 1. \quad (3.15)$$

L'équation 3.15 est indépendante de l'instant i et nous utilisons l'équation 3.8 pour évaluer la valeur moyenne de la largeur de bande de signalisation. En se référant à l'annexe I.1.3 (équation I.22), on obtient :

$$\bar{b}^s = \frac{q_a}{q_f}(b_{EC} + q b_{RP}). \quad (3.16)$$

En substituant les équations 3.13 et 3.16 dans 3.6, nous aurons :

$$\bar{b}^p = \frac{\bar{L}}{q_f}b + \frac{q_a(1-q)(1-q_f)\bar{H}}{q_f[1-(1-q_aq)(1-q_f)]}b + \frac{q_a}{q_f}(b_{EC} + q b_{RP}) \quad (3.17)$$

Dans l'équation 3.17, on remarque que le premier terme représente la largeur de bande liée au chemin original et aux chemins résultants des réacheminements, alors que le deuxième terme représente la largeur de bande additionnelle due aux extensions des chemins. Finalement, le dernier terme représente la largeur de bande de signalisation due aux extensions et aux optimisations des chemins.

3.3.2.2 Délai de handoff par appel de la stratégie à deux phases

Nous proposons dans cette section de généraliser le modèle de [110] en le complétant par un calcul du délai moyen de handoff par appel. Pour cela, nous définissons :

- d le temps nécessaire pour réserver la largeur de bande b sur une liaison du nouveau chemin étendu (H_i) et/ou partiel (L_i^p) d'un appel ;
- d_{RP} le délai impliqué par la signalisation pour chaque réacheminement partiel ;
- d_{EC} le délai de signalisation pour chaque extension du chemin.

Le paramètre d_{RP} inclut le délai requis pour : (1) la localisation du commutateur de handoff ; (2) la signalisation pour l'établissement de la nouvelle portion de la connexion ; (3) la signalisation pour l'achèvement de l'ancienne portion de la connexion et finalement (4) la mise à jour du statut de l'acheminement existant par le serveur de la connexion. Le paramètre d_{EC} est le délai de signalisation pour établir le chemin étendu entre le commutateur original et le commutateur cible.

De façon générale, nous pouvons estimer le délai moyen par appel en utilisant l'équation 3.6. Pour évaluer \bar{d} , nous avons besoin de calculer $E[d_i^s]$ et $E[d_i^l]$.

Dans une première étape, nous évaluons le délai de signalisation d'un handoff se produisant à l'instant i . Ce délai est donné par :

$$d_i^s = I_i(d_{EC} + J_i d_{RP}) \quad i \geq 1 \quad (3.18)$$

dont la moyenne sur les événements de handoffs est donnée par :

$$E[d_i^s] = q_a(d_{EC} + q d_{RP}) \quad i \geq 1. \quad (3.19)$$

Comme $E[d_i^s]$ ne varie pas selon i , on peut utiliser l'équation 3.8 conduisant à la valeur moyenne du délai de signalisation. En se référant à l'annexe II.1 (équation II.3), ce délai est égal à :

$$\overline{d^s} = \frac{q_a}{q_f} (d_{EC} + q d_{RP}) \quad (3.20)$$

Dans une seconde étape, nous calculons le délai moyen d_i^l de réservation de ressources sur les liaisons du nouveau chemin d'une connexion lors d'un handoff dans l'intervalle de temps $[i, i + 1]$. Ce délai est donné par :

$$d_i^l = H_i d I_i (1 - J_i) + L_i^p d I_i J_i. \quad (3.21)$$

En calculant la moyenne de d_i^l sur les événements de handoffs, nous aurons :

$$E[d_i^l] = q_a \left[(1 - q) \overline{H} + q \overline{L^p} \right] d. \quad (3.22)$$

Sachant que $E[d_i^l]$ est indépendante de i , nous utilisons l'équation 3.8 pour calculer la valeur moyenne du délai d_i^l . En nous référant à l'annexe II.1 (équation II.11), le délai est donné par :

$$\overline{d^l} = \frac{q_a}{q_f} \left[(1 - q) \overline{H} + q \overline{L^p} \right] d \quad (3.23)$$

où $\overline{d^l}$ représente la valeur moyenne du délai de réservation de ressources sur les liaisons du nouveau chemin d'une connexion mobile.

En substituant les équations 3.23 et 3.20 dans 3.6, nous obtenons

$$\overline{d^p} = \frac{q_a}{q_f} \left\{ d \left[(1 - q) \overline{H} + q \overline{L^p} \right] + d_{EC} + q d_{RP} \right\} \quad (3.24)$$

Dans l'équation 3.24, le facteur q_a/q_f représente le nombre moyen de handoffs d'un appel et le terme $\{d[(1-q)\bar{H} + q\bar{L^p}] + d_{EC} + qd_{RP}\}$ le délai d'un handoff qui est la somme du délai $d[(1-q)\bar{H} + q\bar{L^p}]$ de réservation de ressources sur les liaisons des chemins résultant de l'extension et du réacheminement, et du délai de signalisation dû à l'extension et au réacheminement ($d_{EC} + qd_{RP}$).

3.3.3 Stratégie de réacheminement partiel

Dans cette section, nous proposons d'évaluer la largeur de bande et le délai moyens par appel pour la stratégie de réacheminement partiel. Contrairement au protocole de handoff à deux phases, cette stratégie doit optimiser le chemin à chaque handoff. À chaque instant $i = 1, 2, \dots$ les évènements suivants peuvent se produire :

1. réacheminement partiel de la connexion dû à un handoff inter-commutateurs,
2. fin d'un appel.

À chaque intervalle $[i, i+1]$, nous définissons L_i^r le nombre de liaisons du chemin partiel entre le commutateur de handoff et le commutateur auquel la station de base cible est rattachée. Sur la figure 2.3, $L_i^r = 2$ pour le chemin partiel entre le commutateur A et le commutateur F .

Nous définissons l'indicateur suivant :

$$K_i = \begin{cases} 1 & \text{dans le cas d'un réacheminement partiel à l'instant } i \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (3.25)$$

Ainsi, à chaque intervalle de temps, le réacheminement partiel est modélisé comme une variable aléatoire de Bernoulli de probabilité q_a , de sorte que $E[K_i] = q_a$.

La largeur de bande et le délai moyens par appel sont maintenant calculés en utilisant le modèle décrit dans la sous-section 3.3.1.

3.3.3.1 Largeur de bande par appel de la stratégie de réacheminement partiel

Pour calculer la largeur de bande moyenne par appel $\bar{b^r}$, nous avons besoin d'évaluer $E[b_i^s]$ et $E[b_i^l]$.

Nous calculons d'abord la largeur de bande de signalisation due à la mobilité à l'instant i , qui est donnée par :

$$b_i^s = K_i b_{RP}. \quad (3.26)$$

La largeur de bande moyenne de signalisation sur les événements de handoffs s'écrit :

$$E[b_i^s] = q_a b_{RP}. \quad (3.27)$$

Comme $E[b_i^s]$ est indépendant de i on obtient, en utilisant l'équation 3.8, la valeur moyenne de la largeur de bande de signalisation. En nous référant à l'annexe I.2.3 (équation I.47), on obtient :

$$\bar{b^s} = \frac{q_a}{q_f} b_{RP}. \quad (3.28)$$

Nous calculons aussi la largeur de bande de la connexion mobile dans l'intervalle de temps $[i, i + 1]$ qui est donnée par :

$$b_i^l = (1 - K_i) b_{i-1}^l + L_i K_i b \quad i \geq 1. \quad (3.29)$$

La moyenne de b_i^l sur les évènements de handoffs est :

$$E[b_i^l] = (1 - q_a)E[b_{i-1}^l] + q_a \bar{L}b. \quad (3.30)$$

La moyenne $E[b_i^l]$ est calculée par récurrence en posant $E[b_0^l] = \bar{L}b$. Comme le résultat obtenu est fonction de i , nous utilisons l'équation 3.7 conduisant à la valeur moyenne de la largeur de bande de la connexion mobile. En nous référant à l'annexe I.2.3 (équation I.48), on obtient :

$$\bar{b}^l = \frac{\bar{L}}{q_f}b. \quad (3.31)$$

En substituant les équations 3.28 et 3.31 à l'équation 3.6, nous obtenons :

$$\bar{b}^r = \frac{1}{q_f} \bar{L}b + \frac{q_a}{q_f} b_{RP}. \quad (3.32)$$

Dans cette équation, le premier terme représente la largeur de bande associée à la connexion originale et aux portions de chemins résultant des réacheminements. Le second terme représente la largeur de bande de signalisation due aux réacheminements partiels.

3.3.3.2 Délai de handoff par appel de la stratégie de réacheminement partiel

Le calcul du délai de handoff moyen par appel nécessite l'évaluation de $E[d_i^s]$ et $E[d_i^l]$. Le calcul de $E[d_i^s]$ est identique à celui du calcul de $E[b_i^s]$ présenté ci-dessus. Ainsi, en remplaçant b par d dans l'équation 3.27, nous obtenons :

$$\bar{d}_i^s = q_a d_{RP}. \quad (3.33)$$

Le délai de handoff de la connexion mobile dans l'intervalle $[i, i + 1]$ est donné par :

$$d_i^l = L_i^r d K_i \quad i \geq 1. \quad (3.34)$$

La moyenne de d_i^l sur les événements de handoffs est :

$$E[d_i^l] = q_a \overline{L^r} d. \quad (3.35)$$

Ainsi, en se référant à l'annexe II.2 (équation II.22) le délai moyen par appel est :

$$\overline{d^r} = \frac{q_a}{q_f} [\overline{L^r} d + d_{RP}] \quad (3.36)$$

où le facteur q_a/q_f est associé au nombre moyen de handoffs d'un appel, q_a étant la probabilité qu'un handoff se produit dans un intervalle et q_f le nombre moyen d'intervalles. Le terme $(\overline{L^r} d + d_{RP})$ représente le délai d'un handoff qui est la somme du délai de réservation de ressources sur le chemin résultant du réacheminement $\overline{L^r} d$ et du délai de signalisation d_{RP} .

3.3.4 Stratégie hiérarchique

La stratégie de handoff hiérarchique est une combinaison du réacheminement partiel et du concept d'arbre de connexions virtuelles. Lorsqu'un mobile se déplace à l'intérieur d'un sous-réseau, des handoffs intra sous-réseaux peuvent se produire. Dans ce cas, la connexion d'un appel est maintenue grâce à l'arbre de connexions virtuelles de sorte que le réacheminement est exécuté très rapidement. Si le mobile change de sous-réseau, un nouveau réacheminement combinant un réacheminement

partiel et un réacheminement dans l'arbre de connexions virtuelles permet de maintenir la connexion de l'appel. Comme les ressources sont déjà réservées à l'intérieur des sous-réseaux, le réacheminement partiel n'est requis que pour les handoffs inter sous-réseaux, .

Le modèle décrit dans la sous-section 3.3.1 sera encore une fois utilisé pour calculer la largeur de bande moyenne et le délai moyen par appel du handoff hiérarchique. Cependant, contrairement aux stratégies à deux phases et de réacheminement partiel, le modèle hiérarchique doit optimiser le chemin à chaque handoff inter sous-réseaux. Les évènements qui peuvent se produire durant chaque intervalle de temps sont :

1. le réacheminement partiel suite à un handoff inter sous-réseaux ;
2. la fin de l'appel.

Comme dans le cas du réacheminement partiel, l'extension de chemin ne se produit pas dans le modèle hiérarchique. D'autre part, les handoffs intra sous-réseaux ne sont pas inclus car ils ne génèrent aucun trafic de signalisation.

Soit q'_a la probabilité qu'il y ait un handoff inter sous-réseaux compte tenu qu'il y a handoff, et donc un réacheminement hiérarchique. On peut écrire $q'_a = \theta q_a$, où $0 \leq \theta \leq 1$ représente la fraction de handoffs inter sous-réseaux sur l'ensemble des handoffs q_a . Le paramètre θ dépend de la structure du réseau. On trouvera en annexe IV un modèle explicite permettant d'estimer la valeur de θ .

Les handoffs inter sous-réseaux seront modélisés par un processus de Bernoulli. D'autre part, dans chaque intervalle de temps, nous définissons :

- L_i^h le nombre de liaisons entre le nœud-racine du sous-réseau auquel appartient le mobile et le point-extrémité. Ce nombre est égal à 3 pour un mobile rattaché au nœud-racine C dans la figure 2.6 ;

- L_i^{hp} le nombre de liaisons du chemin partiel entre le commutateur de handoff et le nœud-racine du sous-réseau cible, c'est-à-dire le sous-réseau vers lequel s'est produit le handoff. Dans l'exemple de la figure 2.6, ce nombre prend la valeur 2 pour la portion de chemin réacheminée du commutateur A vers le commutateur J ;
- L^{hr} le nombre total de liaisons dans les sous-réseaux.

D'autre part, les variables aléatoires L_i^h et L_i^{hp} suivent respectivement des distributions générales de moyenne \overline{L}^h et \overline{L}^{hp} .

3.3.4.1 Largeur de bande par appel de la stratégie hiérarchique

La procédure de calcul de la largeur de bande est identique à celle du réacheminement partiel. En posant $\overline{L} = \overline{L}^h$ et $q_a = q'_a$ dans l'équation 3.32, nous obtenons

$$\bar{b} = \frac{1}{q_f} (\overline{L}^h b + q'_a b_{RP}). \quad (3.37)$$

On réfère le lecteur à l'annexe I, équation I.51.

À cette largeur de bande vient s'ajouter la largeur de bande fixe b^{hr} due à la réservation des ressources dans les sous-réseaux :

$$b^{hr} = L^{hr}(b + b_{RP}). \quad (3.38)$$

En combinant les deux, on obtient :

$$\overline{b} = \frac{1}{q_f} \overline{L}^h b + L^{hr} b + L^{hr} b_{RP} + \frac{q'_a}{q_f} b_{RP}. \quad (3.39)$$

Pour plus de détails sur la dérivation de cette équation, nous renvoyons le lecteur à l'annexe I.3.

Dans l'équation 3.39, le premier terme représente la largeur de bande du chemin d'origine et des chemins résultants des réacheminements. Le deuxième terme est associé à la largeur de bande fixe due à la réservation des ressources sur les liaisons des sous-réseaux alors que le troisième est la largeur de bande additionnelle de signalisation due aux réacheminements partiels suite à des handoffs inter sous-réseaux. Finalement, le dernier terme est associé à la largeur de bande fixe requise pour la transmission des messages de signalisation le long des liens des sous-réseaux.

3.3.4.2 Délai de handoff par appel de la stratégie hiérarchique

Le délai moyen par appel est évalué en utilisant la procédure de calcul de la largeur de bande de la stratégie de réacheminement partiel en remplaçant b par d , $q_a = q'_a$ et $\overline{L^r}$ par $\overline{L^{hp}}$ dans l'équation 3.36. On trouve en consultant l'annexe II.3

$$\overline{d^h} = \frac{q'_a}{q_f} [\overline{L^{hp}}d + d_{RP}] . \quad (3.40)$$

Dans l'équation 3.40, le facteur q_a/q_f est le nombre moyen de handoffs d'un appel. Le terme $(\overline{L^{hp}}d + d_{RP})$ est le délai d'un handoff. Ce dernier est la somme du délai de réservation de la largeur de bande sur la portion du chemin réacheminé $\overline{L^{hp}}d$ et du délai de signalisation d_{RP} .

3.3.5 Comparaison des stratégies de handoff

À ce stade-ci de notre étude, nous pouvons d'ores et déjà faire quelques constatations sur ces mesures de performance. Prenons le cas simple de la largeur de bande et du délai du réacheminement partiel donnés respectivement par les équations 3.32 et 3.36. En comparant ces mesures avec celles de la stratégie hiérarchique données par les équations 3.37 et 3.40, nous constatons que la seule différence qui existe entre ces équations est dans la longueur du chemin (\bar{L} , \bar{L}^h , \bar{L}^r et \bar{L}^{hp}). Si on suppose que les deux stratégies utilisent le même protocole de signalisation, nous pouvons conclure, comme $\bar{L}^{hp} < \bar{L}^r$ et $\bar{L}^{hp} < \bar{L}$, que la largeur de bande moyenne et le délai moyen par appel de la stratégie hiérarchique sont en général plus faibles.

De même, nous pouvons comparer le délai de la stratégie à deux phases donné par l'équation 3.24 avec celui du handoff hiérarchique donné par l'équation 3.40. Dans ce cas, quand seule l'extension du chemin est exécutée ($q = 0$) et sachant que d_{EC} est plus faible que d_{RP} , le délai de la stratégie à deux phases peut être moins élevé que celui associé à la procédure hiérarchique sous la condition $\bar{H} \leq \bar{L}^{hp}$. L'hypothèse $d_{EC} < d_{RP}$ découle du fait, qu'en général, la signalisation pour l'extension du chemin est moins complexe que celle du réacheminement. Si l'optimisation du nombre de lien de la connexion est exécutée après chaque extension du chemin ($q = 1$), alors le délai de la stratégie à deux phases est plus élevé que celui obtenu avec la stratégie hiérarchique. En effet, dans ce cas nous avons non seulement $\bar{L}^p > \bar{L}^{hp}$, mais aussi nous avons un délai additionnel qui est celui de la signalisation due aux extensions. Pour $0 < q < 1$, le délai de la stratégie à deux phases sera plus élevé que celui du hiérarchique si la condition suivante est satisfaite

$$q > \frac{(\bar{L}^{hp} - \bar{H})d + d_{RP} - d_{EC}}{(\bar{L}^p - \bar{H})d + d_{RP}}. \quad (3.41)$$

La valeur q dépend de la mobilité dans le réseau. En général, la probabilité d'optimiser le chemin augmente lorsque le degré de mobilité est élevé. Le terme de droite de l'inégalité 3.41 dépend de \overline{L}^{hp} et \overline{L}^p pour des protocoles de signalisation d'extension et de réacheminement donnés. Ainsi, plus \overline{L}^{hp} est petit devant \overline{L}^p , plus le terme de droite de l'inégalité est faible. Dans ce cas, nous pouvons choisir la stratégie hiérarchique qui assure un délai plus faible que celui de la stratégie à deux phases pour couvrir plusieurs réseaux mobiles avec différentes probabilités q . Plus \overline{L}^{hp} s'approche de la valeur de \overline{L}^p , plus le terme de droite de l'inégalité est grand, ce qui nous amène à choisir la stratégie à deux phases pour assurer un délai plus faible que celui obtenu avec la stratégie hiérarchique indépendamment de la probabilité q .

On peut difficilement comparer la largeur de bande donnée par l'équation 3.17 avec celle de la stratégie hiérarchique donnée par l'équation 3.39. D'une part, nous avons le terme résultant des extensions de chemins, et d'autre part des termes de réservation des ressources dans les sous-réseaux. On retrouve la même situation pour la largeur de bande de la stratégie de réacheminement partiel donnée par l'équation 3.32 et celle du handoff hiérarchique donnée par l'équation 3.39. L'analyse numérique présentée dans le chapitre 4 permettra d'évaluer et de comparer ces mesures en fonction des paramètres mentionnés.

Ayant évalué la largeur de bande moyenne et le délai moyen par appel pour l'ensemble des stratégies de handoffs considérées, nous poursuivons avec une analyse de la probabilité de blocage d'appels.

3.4 Évaluation de la probabilité de blocage d'appels

Nous proposons ici un modèle général de calcul de la probabilité de blocage sous les hypothèses suivantes. Les arrivées de différents types d'appels sont supposées indépendantes et suivent une loi de Poisson. Notre modèle utilise un processus de naissance et de mort multidimensionnel dont le nombre d'états est en général supérieur au nombre total C de canaux radio alloués à une cellule.

3.4.1 Stratégie à deux phases

3.4.1.1 Modèle

L'état e d'une cellule est défini comme :

$$e = (i, j) \quad (3.42)$$

où :

- i est le nombre de nouveaux appels présents dans la cellule, $0 \leq i \leq C - C_h$;
- j est le nombre d'appels de handoffs présents dans la cellule, $0 \leq j \leq C$.

L'affectation des canaux radio dans une cellule correspond à la procédure suivante :

- les nouveaux appels sont bloqués quand $i = (C - C_h)$ ou $i + j = C$,
- les appels de handoffs sont bloqués uniquement quand $i + j = C$,

où C_h , $0 \leq C_h \leq C$ représente le nombre de canaux mis en réserve pour l'utilisation exclusive de transfert d'appels dus aux handoffs.

On suppose que les arrivées de nouveaux appels et des handoffs sont caractérisées par des processus de Poisson indépendants. On définit :

- A le trafic total offert ;
- β le rapport du trafic des handoffs A_h sur le trafic total A ;
- A_n le trafic offert des nouveaux appels, $A_n = (1 - \beta)A$;
- A_h le trafic offert de demandes de handoffs, $A_h = \beta A$.

La probabilité stationnaire $P(i, j)$ d'avoir i nouveaux appels et j demandes de handoffs est donnée par l'équation suivante :

$$P(i, j) = \frac{A^{(i+j)}}{K} \frac{(1 - \beta)^i}{i!} \frac{\beta^j}{j!} \quad (3.43)$$

avec $0 \leq i \leq C - C_h$, $0 \leq j \leq C - i$ et où la constante K de normalisation prend la valeur

$$K = \sum_{i=0}^{C-C_h} \sum_{j=0}^{C-i} A^{(i+j)} \frac{(1 - \beta)^i}{i!} \frac{\beta^j}{j!} \quad (3.44)$$

Le détail du calcul des valeurs de $P(i, j)$ est donné à l'annexe III.

3.4.1.2 Probabilité de blocage d'appels

On propose de calculer la probabilité de blocage des nouveaux appels $P_{nouveaux}$ et des demandes de handoff $P_{handoff}$. La figure 3.2 illustre les différentes transitions entre les états de la stratégie à deux phases pour les valeurs $C = 5$ et $C_h = 2$. Dans cette figure, P_1 et P_2 sont des probabilités d'état intervenant dans le calcul de la probabilité de blocage des appels de handoffs et des nouveaux appels. On peut exprimer la probabilité de blocage $P_{handoff}$ et $P_{nouveaux}$ en fonction de P_1 et P_2 :

$$\begin{aligned} P_{handoff} &= P_1 = P - P_2 \\ &= P - P(i + j = C, \quad j < C_h) \end{aligned}$$

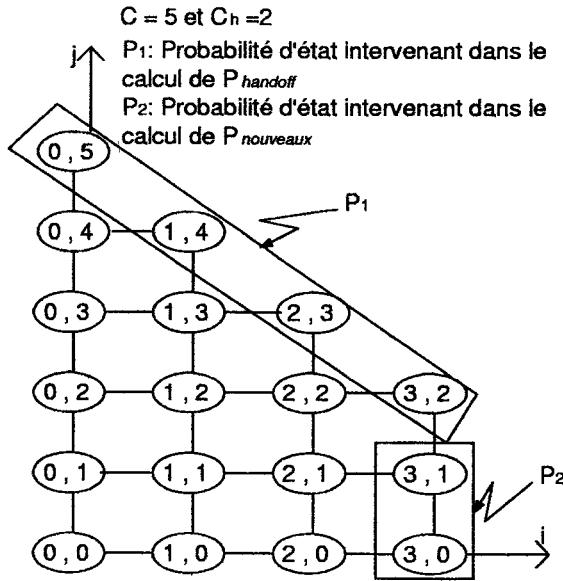


Fig. 3.2 Probabilité d'état intervenant dans le calcul des probabilités de blocage d'appels de la stratégie à deux phases

$$\begin{aligned}
 &= P - \sum_{j=0}^{C_h-1} \frac{A^{C-j}(1-\beta)^{C-j}}{K(C-j)!} \frac{A^j \beta^j}{j!} \\
 &= P - \frac{A^C}{K} \sum_{j=0}^{C_h-1} \frac{(1-\beta)^{C-j} \beta^j}{(C-j)!} \frac{1}{j!}
 \end{aligned} \tag{3.45}$$

où

$$\begin{aligned}
 P &= P(i+j = C, 0 \leq j \leq C) \\
 &= \sum_{j=0}^C \frac{A^{C-j}(1-\beta)^{C-j}}{K(C-j)!} \frac{A^j \beta^j}{j!} \\
 &= \frac{A^C}{K} \sum_{j=0}^C \frac{(1-\beta)^{C-j} \beta^j}{(C-j)!} \frac{1}{j!} \\
 &= \frac{A^C}{KC!}
 \end{aligned} \tag{3.46}$$

En substituant l'équation 3.46 à l'équation 3.45 on trouve :

$$\begin{aligned} P_{\text{handoff}} &= \frac{A^C}{KC!} - \frac{A^C}{K} \sum_{j=0}^{C_h-1} \frac{(1-\beta)^{C-j} \beta^j}{(C-j)!} \frac{\beta^j}{j!} \\ &= \frac{A^C}{K} \left[\frac{1}{C!} - \sum_{j=0}^{C_h-1} \frac{(1-\beta)^{C-j} \beta^j}{(C-j)!} \frac{\beta^j}{j!} \right] \end{aligned} \quad (3.47)$$

On peut aussi écrire

$$\begin{aligned} P_{\text{nouveaux}} &= P_{\text{handoff}} + P_2 \\ &= P_{\text{handoff}} + P(i = C - C_h, j < C_h) \\ &= P_{\text{handoff}} + \sum_{j=0}^{C_h-1} \frac{A^{C-C_h} (1-\beta)^{C-C_h}}{K(C-C_h)!} \frac{A^j \beta^j}{j!} \\ &= P_{\text{handoff}} + \frac{(A(1-\beta))^{C-C_h}}{K(C-C_h)!} \sum_{j=0}^{C_h-1} \frac{A^j \beta^j}{j!} \end{aligned} \quad (3.48)$$

La démonstration de la validité des équations 3.47 et 3.48 est basée sur l'interprétation suivante des probabilités de blocage. Les probabilités de blocage représentent les fractions de deux types de trafic qui sont bloqués par le système. Pour chaque type d'appel, cette fraction est définie comme suit :

$$P = \frac{A_{\text{off}} - A_{\text{veh}}}{A_{\text{off}}} = 1 - \frac{A_{\text{veh}}}{A_{\text{off}}} \quad (3.49)$$

où A_{veh} est le trafic écoulé d'un type donné (nouveaux appels ou appels de handoffs) et A_{off} est le trafic offert du même type.

Ainsi, nous avons

$$\begin{cases} P_{\text{handoff}} = 1 - \frac{A_{\text{veh}}}{A_{\text{off}}} = 1 - \frac{\sum_{i=0}^{C-C_h} \sum_{j=1}^{C-i} j P(i, j)}{\beta A} \\ P_{\text{nouveaux}} = 1 - \frac{A_{\text{veh}}}{A_{\text{off}}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{C-C_h} \sum_{j=0}^{C-i} i P(i, j)}{(1-\beta)A} \end{cases} \quad (3.50)$$

Nous obtenons :

$$\begin{aligned} P_{\text{handoff}} &= 1 - \frac{1}{\beta A} \sum_{i=0}^{C-C_h} \sum_{j=1}^{C-i} j P(i, j) \\ &= 1 - \frac{1}{\beta A} \sum_{i=0}^{C-C_h} \sum_{l=0}^{C-i-1} (l+1) P(i, l+1) \\ &= 1 - \frac{1}{\beta A} \sum_{i=0}^{C-C_h} \sum_{l=0}^{C-i-1} \beta A P(i, l) \\ &= 1 - \sum_{i=0}^{C-C_h} \sum_{l=0}^{C-i-1} P(i, l) \end{aligned} \quad (3.51)$$

Cette expression exige $(C - C_h + 1)(C + C_h)/2$ itérations, ce qui représente un grand nombre puisque souvent $C_h \ll C$. Une forme alternative exigeant seulement C_h sommes peut être trouvée. Elle s'écrit :

$$\begin{aligned} P_{\text{handoff}} &= \sum_{i=0}^{C-C_h} P(i, C-i) \\ &= \sum_{i=0}^C P(i, C-i) - \sum_{i=C-C_h+1}^C P(i, C-i) \\ &= \sum_{i=0}^C P(i, C-i) - \sum_{j=0}^{C_h-1} P(C-j, j) \\ &= \frac{A^C}{K} \left[\frac{1}{C!} - \sum_{j=0}^{C_h-1} \frac{(1-\beta)^{C-j} \beta^j}{(C-j)! j!} \right] \end{aligned} \quad (3.52)$$

Nous avons aussi :

$$\begin{aligned}
P_{nouveaux} &= 1 - \frac{\sum_{i=1}^{C-C_h} \sum_{j=0}^{C-i} i P(i, j)}{(1-\beta)A} \\
&= 1 - \frac{\sum_{l=0}^{C-C_h-1} \sum_{j=0}^{C-l-1} (l+1) P(l+1, j)}{(1-\beta)A} \\
&= 1 - \frac{\sum_{l=0}^{C-C_h-1} \sum_{j=0}^{C-l-1} (1-\beta) A P(l, j)}{(1-\beta)A} \\
&= 1 - \sum_{l=0}^{C-C_h-1} \sum_{j=0}^{C-l-1} P(l, j) \\
&= \sum_{l=0}^{C-C_h} \sum_{j=0}^{C-l} P(l, j) - \sum_{l=0}^{C-C_h-1} \sum_{j=0}^{C-l-1} P(l, j) \\
&= \sum_{l=0}^{C-C_h} P(l, C-l) + \sum_{j=0}^{C_h} P(C-C_h, j) \\
&= \sum_{l=0}^{C-C_h} P(l, C-l) + \sum_{j=0}^{C_h-1} P(C-C_h, j) \\
&= P_{handoff} + \sum_{j=0}^{C_h-1} P(C-C_h, j)
\end{aligned} \tag{3.53}$$

Ainsi, nous avons

$$P_{nouveaux} - P_{handoff} = \frac{[A(1-\beta)]^{C-C_h}}{(C-C_h)!} \sum_{j=0}^{C_h-1} \frac{(A\beta)^j}{j!} \tag{3.54}$$

À partir de l'équation 3.54 on vérifie que $P_{nouveaux} \geq P_{handoff}$. De plus, quand $C_h = 0$, on a toujours $P_{nouveaux} = P_{handoff} = E_B(A, C)$, où E_B dénote la fonction d'Erlang.

3.4.2 Stratégie de réacheminement partiel

Les valeurs de probabilité de blocage de nouveaux appels et des appels de handoff du modèle de réacheminement partiel sont identiques à celles du modèle à deux phases. En effet, ces deux modèles ne comportent que des handoffs inter-commutateurs. Ainsi, la probabilité de blocage de nouveaux appels et des demandes de handoffs du modèle de réacheminement partiel sont celles données par les équations 3.52 et 3.53.

3.4.3 Stratégie hiérarchique

Rappelons que la stratégie hiérarchique comporte deux types de handoff : intra et inter sous-réseaux. Un handoff intra sous-réseaux s'exécute rapidement si un canal radio est disponible. Il ne nécessite pas de réacheminement de la connexion. Au contraire, le handoff inter sous-réseaux nécessite un certain délai d'exécution de la procédure de réacheminement partiel. Dans ce cas, la probabilité de blocage des handoffs comporte deux termes relatifs respectivement aux handoffs intra et inter sous-réseaux.

3.4.3.1 Modèle

On définit l'état e d'une cellule comme :

$$e = (i, j, k) \quad (3.55)$$

où :

- i est le nombre de nouveaux appels, $0 \leq i \leq C - C_{h1}$;
- j est le nombre d'appels de handoff intra sous-réseaux, $0 \leq j \leq C - C_{h2}$;
- k est le nombre d'appels de handoff inter sous-réseaux, $0 \leq k \leq C$

où C_{h1} et C_{h2} représentent deux paramètres permettant de limiter le nombre des nouveaux appels à $C - C_{h1}$ et le nombre de handoffs intra sous-réseaux à $C - C_{h2}$.

On peut donc définir la politique d'allocation de canaux suivante :

- les nouveaux appels sont bloqués quand $i = (C - C_{h1})$ ou $i + j + k = C$;
- les handoffs intra sous-réseaux sont bloqués quand $j = (C - C_{h2})$ ou $i + j + k = C$;
- les handoffs inter sous-réseaux sont bloqués quand $i + j + k = C$.

Les arrivées des nouveaux appels et des handoffs intra et inter sous-réseaux sont caractérisées par des processus de Poisson indépendants et leur durée est exponentielle.

On définit les paramètres suivants :

- A le trafic total offert,
- A_n le trafic offert de nouveaux appels, $A_n = (1 - \beta_{h1} - \beta_{h2})A$,
- A_{h1} le trafic offert des handoffs intra sous-réseaux, $A_{h1} = \beta_{h1}A$,
- A_{h2} le trafic offert des handoffs inter sous-réseaux, $A_{h2} = \beta_{h2}A$,
- β_{h1} la fraction de trafic des handoffs intra sous-réseaux A_{h1} sur le trafic total A ,
- β_{h2} la fraction de trafic des handoffs inter sous-réseaux A_{h2} sur le trafic total A .

Avec $A = A_n + A_{h1} + A_{h2}$ et $0 \leq \beta_{h1} + \beta_{h2} \leq 1$. Il existe deux cas pour le calcul de la probabilité stationnaire $P(i, j, k)$:

$$P(i, j, k) = \frac{A^{(i+j+k)}}{K} \frac{(1 - \beta_{h1} - \beta_{h2})^i}{i!} \frac{\beta_{h1}^j}{j!} \frac{\beta_{h2}^k}{k!} \quad (3.56)$$

- Cas 1 : $C_{h1} + C_{h2} \leq C$

$$K = \sum_{i=0}^{C_{h2}} \sum_{j=0}^{C-C_{h2}} \sum_{k=0}^{C-i-j} A^{(i+j+k)} \frac{(1 - \beta_{h1} - \beta_{h2})^i}{i!} \frac{\beta_{h1}^j}{j!} \frac{\beta_{h2}^k}{k!} +$$

$$\sum_{i=C_{h2}+1}^{C-C_{h1}} \sum_{j=0}^{C-i} \sum_{k=0}^{C-i-j} A^{(i+j+k)} \frac{(1-\beta_{h1}-\beta_{h2})^i}{i!} \frac{\beta_{h1}^j}{j!} \frac{\beta_{h2}^k}{k!} \quad (3.57)$$

– Cas 2 : $C_{h1} + C_{h2} > C$

$$K = \sum_{i=0}^{C-C_{h1}} \sum_{j=0}^{C-C_{h2}} \sum_{k=0}^{C-i-j} A^{(i+j+k)} \frac{(1-\beta_{h1}-\beta_{h2})^i}{i!} \frac{\beta_{h1}^j}{j!} \frac{\beta_{h2}^k}{k!} \quad (3.58)$$

Les détails de la dérivation des valeurs $P(i, j, k)$ sont donnés en annexe III.

3.4.3.2 Évaluation de la probabilité de blocage d'appels

Dans ce cas, on peut définir trois probabilités de blocage qui sont la probabilité de blocage des nouveaux appels $P_{nouveaux}$, la probabilité de blocage des handoffs intra sous-réseaux P_{intra} et la probabilité de blocage des handoffs inter sous-réseaux P_{inter} . Ces probabilités doivent être évaluées séparément pour les conditions $C_{h1} + C_{h2} \leq C$ et $C_{h1} + C_{h2} > C$.

3.4.3.2.1 Cas 1 : $C_{h1} + C_{h2} \leq C$ La figure 3.3 illustre différents événements dont les valeurs de probabilités seront utiles par la suite. P_1 est la probabilité d'état correspondant aux conditions $i = C - C_{h1}$, $j \leq C_{h1}$ et $k < C_{h1} - j$. De la même manière, on définit P_2 comme la probabilité d'état tels que $j = C - C_{h2}$, $i \leq C_{h2}$ et $k < C_{h2} - i$ et finalement P_3 qui correspond à la probabilité d'état tels que $i + j + k = C$, $i \leq C - C_{h1}$ et $j \leq C - C_{h2} - i$. À partir de ces définitions, on peut écrire

$$\begin{aligned} P_{inter} &= P_3 \\ &= P(i + j + k = C, \quad 0 \leq i \leq C_{h2}, \quad 0 \leq j \leq C - C_{h2}) + \\ &\quad P(i + j + k = C, \quad C_{h2} + 1 \leq i \leq C - C_{h1}, \quad 0 \leq j \leq C - i) \end{aligned}$$

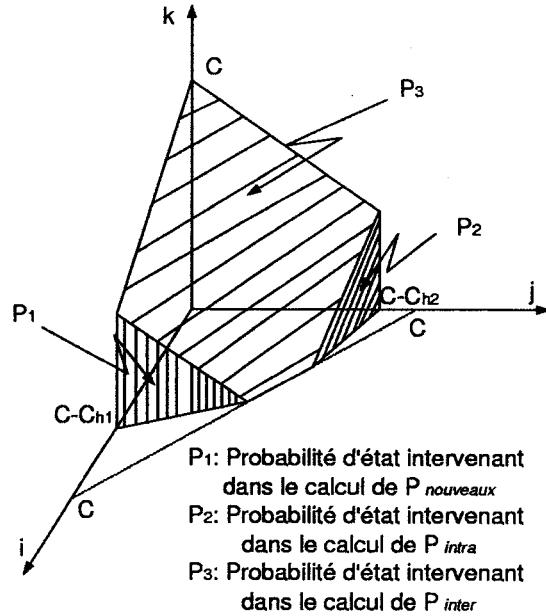


Fig. 3.3 Probabilité d'état intervenant dans le calcul des probabilités de blocage d'appels de la stratégie hiérarchique dans le cas où $C_{h1} + C_{h2} \leq C$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{A^C}{K} \sum_{i=0}^{C_{h2}} \sum_{j=0}^{C-C_{h2}} \frac{(1 - \beta_{h1} - \beta_{h2})^i \beta_{h1}^j}{i! j!} \frac{\beta_{h2}^{C-(i+j)}}{(C - (i+j))!} + \\
 &\quad \frac{A^C}{K} \sum_{i=C_{h2}+1}^{C-C_{h1}} \sum_{j=0}^{C-i} \frac{(1 - \beta_{h1} - \beta_{h2})^i \beta_{h1}^j}{i! j!} \frac{\beta_{h2}^{C-(i+j)}}{(C - (i+j))!}
 \end{aligned} \tag{3.59}$$

On peut aussi écrire :

$$\begin{aligned}
 P_{intra} &= P_{inter} + P_2 \\
 &= P_{inter} + \\
 &\quad P(j = C - C_{h2}, \quad 0 \leq i \leq C_{h2}, \quad 0 \leq k \leq C_{h2} - i - 1) \\
 &= P_{inter} + \\
 &\quad \frac{(A\beta_{h1})^{(C-C_{h2})}}{K(C - C_{h2})!} \sum_{i=0}^{C_{h2}} \sum_{k=0}^{C_{h2}-i-1} \frac{A^{i+k} (1 - \beta_{h1} - \beta_{h2})^i \beta_{h2}^k}{i! k!}.
 \end{aligned} \tag{3.60}$$

On a aussi :

$$\begin{aligned}
P_{nouveaux} &= P_{inter} + P_1 \\
&= P_{inter} + \\
&\quad P(i = C - C_{h1}, \quad 0 \leq i \leq C_{h1} \quad \text{et} \quad 0 \leq k \leq C_{h1} - i - 1) \\
&= P_{inter} + \\
&\quad \frac{(A(1 - \beta_{h1} - \beta_{h2}))^{(C - C_{h1})}}{K(C - C_{h1})!} \sum_{j=0}^{C_{h1}} \sum_{k=0}^{C_{h1}-j-1} \frac{A^{j+k} \beta_{h1}^j \beta_{h2}^k}{j! k!}. \tag{3.61}
\end{aligned}$$

La preuve des équations 3.59, 3.60 et 3.61 est basée sur la probabilité de blocage définie par la relation 3.49. À partir de cette relation, nous pouvons écrire :

$$\begin{aligned}
P_{inter} &= 1 - \frac{\sum_{i=0}^{C_{h2}} \sum_{j=0}^{C-C_{h2}} \sum_{k=1}^{C-(i+j)} k P(i, j, k)}{\beta_{h2} A} + \\
&\quad \frac{\sum_{i=C_{h2}+1}^{C-C_{h1}} \sum_{j=0}^{C-i} \sum_{k=1}^{C-(i+j)} k P(i, j, k)}{\beta_{h2} A} \\
P_{intra} &= 1 - \frac{\sum_{i=0}^{C_{h2}} \sum_{j=1}^{C-C_{h2}} \sum_{k=0}^{C-(i+j)} j P(i, j, k)}{\beta_{h1} A} + \\
&\quad \frac{\sum_{i=C_{h2}+1}^{C-C_{h1}} \sum_{j=1}^{C-i} \sum_{k=0}^{C-(i+j)} j P(i, j, k)}{\beta_{h1} A} \tag{3.62}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P_{nouveaux} &= 1 - \frac{\sum_{i=1}^{C_{h2}} \sum_{j=0}^{C-C_{h2}} \sum_{k=0}^{C-(i+j)} i P(i, j, k)}{(1 - (\beta_{h1} - \beta_{h2})) A} + \\
&\quad \frac{\sum_{i=C_{h2}+1}^{C-C_{h1}} \sum_{j=0}^{C-i} \sum_{k=0}^{C-(i+j)} i P(i, j, k)}{(1 - (\beta_{h1} - \beta_{h2})) A} \tag{3.63}
\end{aligned}$$

Nous obtenons :

$$\begin{aligned}
P_{inter} &= 1 - \frac{1}{\beta_{h2}A} \sum_{i=0}^{C_{h2}} \sum_{j=0}^{C-C_{h2}} \sum_{k=1}^{C-(i+j)} k P(i, j, k) - \\
&\quad \frac{1}{\beta_{h2}A} \sum_{i=C_{h2}+1}^{C-C_{h1}} \sum_{j=0}^{C-i} \sum_{k=1}^{C-(i+j)} k P(i, j, k) \\
&= 1 - \frac{1}{\beta_{h2}A} \sum_{i=0}^{C_{h2}} \sum_{j=0}^{C-C_{h2}} \sum_{l=0}^{C-(i+j)-1} (l+1) P(i, j, l+1) - \\
&\quad \frac{1}{\beta_{h2}A} \sum_{i=C_{h2}+1}^{C-C_{h1}} \sum_{j=0}^{C-i} \sum_{l=0}^{C-(i+j)-1} (l+1) P(i, j, l+1) \\
&= 1 - \frac{1}{\beta_{h2}A} \sum_{i=0}^{C_{h2}} \sum_{j=0}^{C-C_{h2}} \sum_{l=0}^{C-(i+j)-1} \beta_{h2} A P(i, j, l) - \\
&\quad \frac{1}{\beta_{h2}A} \sum_{i=C_{h2}+1}^{C-C_{h1}} \sum_{j=0}^{C-i} \sum_{l=0}^{C-(i+j)-1} \beta_{h2} A P(i, j, l) \\
&= 1 - \sum_{i=0}^{C_{h2}} \sum_{j=0}^{C-C_{h2}} \sum_{l=0}^{C-(i+j)-1} P(i, j, l) - \sum_{i=C_{h2}+1}^{C-C_{h1}} \sum_{j=0}^{C-i} \sum_{l=0}^{C-(i+j)-1} P(i, j, l) \\
&= \sum_{i=0}^{C_{h2}} \sum_{j=0}^{C-C_{h2}} P(i, j, C-(i+j)) + \sum_{i=C_{h2}+1}^{C-C_{h1}} \sum_{j=0}^{C-i} P(i, j, C-(i+j)) \\
&= \frac{AC}{K} \sum_{i=0}^{C_{h2}} \sum_{j=0}^{C-C_{h2}} \frac{(1-\beta_{h1}-\beta_{h2})^i}{i!} \frac{\beta_{h1}^j}{j!} \frac{\beta_{h2}^{C-(i+j)}}{(C-(i+j))!} + \\
&\quad \frac{AC}{K} \sum_{i=C_{h2}+1}^{C-C_{h1}} \sum_{j=0}^{C-i} \frac{(1-\beta_{h1}-\beta_{h2})^i}{i!} \frac{\beta_{h1}^j}{j!} \frac{\beta_{h2}^{C-(i+j)}}{(C-(i+j))!} \\
&= P_3. \tag{3.64}
\end{aligned}$$

Nous avons :

$$\begin{aligned}
P_{intra} &= 1 - \frac{1}{\beta_{h1}A} \sum_{i=0}^{C_{h2}} \sum_{j=1}^{C-C_{h2}} \sum_{k=0}^{C-(i+j)} j P(i, j, k) - \\
&\quad \frac{1}{\beta_{h1}A} \sum_{i=C_{h2}+1}^{C-C_{h1}} \sum_{j=1}^{C-i} \sum_{k=0}^{C-(i+j)} j P(i, j, k) \\
&= 1 - \frac{1}{\beta_{h1}A} \sum_{i=0}^{C_{h2}} \sum_{l=0}^{C-C_{h2}-1} \sum_{k=0}^{C-(i+l)-1} (l+1) P(i, l+1, k) -
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{\beta_{h1}A} \sum_{i=C_{h2}+1}^{C-C_{h1}} \sum_{l=0}^{C-i-1} \sum_{k=0}^{C-(i+l)-1} (l+1)P(i, l+1, k) \\
= & 1 - \frac{1}{\beta_{h1}A} \sum_{i=0}^{C_{h2}} \sum_{l=0}^{C-C_{h2}-1} \sum_{k=0}^{C-(i+l)-1} \beta_{h1}AP(i, l, k) - \\
& \frac{1}{\beta_{h1}A} \sum_{i=C_{h2}+1}^{C-C_{h1}} \sum_{l=0}^{C-i-1} \sum_{k=0}^{C-(i+l)-1} \beta_{h1}AP(i, l, k) \\
= & 1 - \sum_{i=0}^{C_{h2}} \sum_{l=0}^{C-C_{h2}-1} \sum_{k=0}^{C-(i+l)-1} P(i, l, k) - \\
& \sum_{i=C_{h2}+1}^{C-C_{h1}} \sum_{l=0}^{C-i-1} \sum_{k=0}^{C-(i+l)-1} P(i, l, k) \\
= & \sum_{i=0}^{C_{h2}} \sum_{j=0}^{C-C_{h2}} P(i, j, C-(i+j)) + \\
& \sum_{i=C_{h2}+1}^{C-C_{h1}} \sum_{j=0}^{C-i} P(i, j, C-(i+j)) + \\
& \sum_{i=0}^{C_{h2}} \sum_{k=0}^{C_{h2}-i-1} P(i, C-C_{h2}, k) \\
= & P_{inter} + \\
& \frac{(A\beta_{h1})^{(C-C_{h2})}}{K(C-C_{h2})!} \sum_{i=0}^{C_{h2}} \sum_{k=0}^{C_{h2}-i-1} \frac{A^{i+k}(1-\beta_{h1}-\beta_{h2})^i}{i!} \frac{\beta_{h2}^k}{k!} \\
= & P_3 + P_2. \tag{3.65}
\end{aligned}$$

Nous avons aussi :

$$\begin{aligned}
P_{nouveaux} = & 1 - \frac{1}{(1-(\beta_{h1}+\beta_{h2}))A} \sum_{i=1}^{C_{h2}} \sum_{j=1}^{C-C_{h2}} \sum_{k=0}^{C-(i+j)} iP(i, j, k) - \\
& \frac{1}{(1-(\beta_{h1}+\beta_{h2}))A} \sum_{i=C_{h2}+1}^{C-C_{h1}} \sum_{j=1}^{C-i} \sum_{k=0}^{C-(i+j)} iP(i, j, k) \\
= & 1 - \\
& \frac{1}{(1-(\beta_{h1}+\beta_{h2}))A} \sum_{l=0}^{C_{h2}-1} \sum_{j=0}^{C-C_{h2}} \sum_{k=0}^{C-(l+j)-1} (l+1)P(l+1, j, k) - \\
& \frac{1}{(1-(\beta_{h1}+\beta_{h2}))A} \sum_{l=C_{h2}}^{C-C_{h1}-1} \sum_{j=0}^{C-i-1} \sum_{k=0}^{C-(l+j)-1} (l+1)P(l+1, j, k)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= 1 - \\
&\quad \frac{(1 - (\beta_{h1} + \beta_{h2}))A}{(1 - (\beta_{h1} + \beta_{h2}))A} \sum_{l=0}^{C_{h2}-1} \sum_{j=0}^{C-C_{h2}} \sum_{k=0}^{C-(l+j)-1} P(l, j, k) - \\
&\quad \frac{(1 - (\beta_{h1} + \beta_{h2}))A}{(1 - (\beta_{h1} + \beta_{h2}))A} \sum_{l=C_{h2}}^{C-C_{h1}-1} \sum_{j=0}^{C-i-1} \sum_{k=0}^{C-(l+j)-1} P(l, j, k) \\
&= 1 - \\
&\quad \sum_{l=0}^{C_{h2}-1} \sum_{j=0}^{C-C_{h2}} \sum_{k=0}^{C-(l+j)-1} P(l, j, k) - \\
&\quad \sum_{l=C_{h2}}^{C-C_{h1}-1} \sum_{j=0}^{C-i-1} \sum_{k=0}^{C-(l+j)-1} P(l, j, k) \\
&= \sum_{i=0}^{C_{h2}} \sum_{j=0}^{C-C_{h2}} P(i, j, C - (i + j)) + \\
&\quad \sum_{i=C_{h2}+1}^{C-C_{h1}} \sum_{j=0}^{C-i} P(i, j, C - (i + j)) + \\
&\quad \sum_{j=0}^{C_{h1}} \sum_{k=0}^{C_{h1}-j-1} P(C - C_{h1}, j, k) \\
&= P_{inter} + \\
&\quad \frac{(A(1 - \beta_{h1} - \beta_{h2}))^{(C-C_{h1})}}{K(C - C_{h1})!} \sum_{j=0}^{C_{h1}} \sum_{k=0}^{C_{h1}-j-1} \frac{A^{j+k} \beta_{h1}^j \beta_{h2}^k}{j! k!} \\
&= P_3 + P_1 \tag{3.66}
\end{aligned}$$

3.4.3.2.2 Cas 2 : $C_{h1} + C_{h2} > C$ Les différents évènements intervenant dans le calcul de la probabilité de blocage d'appels pour $C_{h1} + C_{h2} > C$ sont illustrés dans la figure 3.4. Dans ce cas, P_1 est la probabilité d'état correspondant aux conditions $i = C - C_{h1}$, $j \leq C - C_{h2}$ et $k < C_{h1} - j$. P_2 est la probabilité d'état tels que $j = C - C_{h2}$, $i \leq C - C_{h1}$ et $k < C_{h2} - i$ et P_3 est celle des états tels que $i + j + k = C$, $i \leq C - C_{h1}$ et $j \leq C - C_{h2}$. À partir de ces définitions, on peut écrire

$$\begin{aligned}
P_{inter} &= P_3 \\
&= P(i + j + k = C, \quad 0 \leq i \leq C - C_{h1}, \quad 0 \leq j \leq C - C_{h2})
\end{aligned}$$

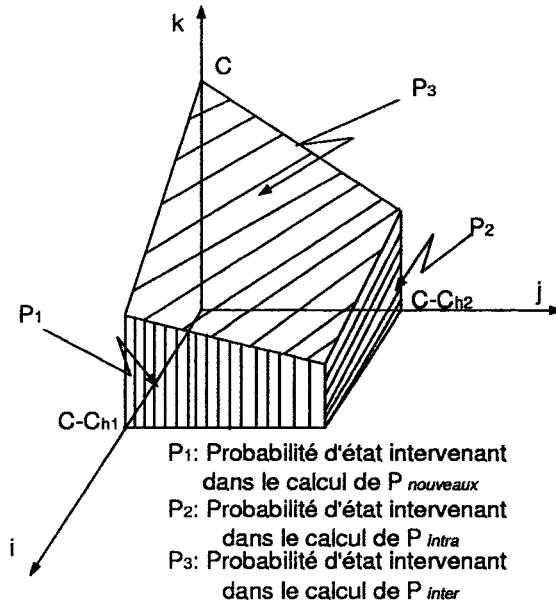


Fig. 3.4 Probabilité d'état intervenant dans le calcul des probabilités de blocage d'appels de la stratégie hiérarchique dans le cas où $C_{h1} + C_{h2} > C$

$$= \frac{A^C}{K} \sum_{i=0}^{C-C_{h1}} \sum_{j=0}^{C-C_{h2}} \frac{(1 - \beta_{h1} - \beta_{h2})^i}{i!} \frac{\beta_{h1}^j}{j!} \frac{\beta_{h2}^{C-(i+j)}}{(C-(i+j))!} \quad (3.67)$$

$$\begin{aligned}
 P_{intra} &= P_{inter} + \\
 &\quad P(j = C - C_{h2}, \quad 0 \leq i \leq C - C_{h1} \quad \text{et} \quad 0 \leq k \leq C_{h2} - i) \\
 &= P_{inter} + \\
 &\quad \frac{(A\beta_{h1})^{(C-C_{h2})}}{K(C - C_{h2})!} \sum_{i=0}^{C-C_{h1}} \sum_{k=0}^{C_{h2}-i-1} \frac{A^{i+k}(1 - \beta_{h1} - \beta_{h2})^i}{i!} \frac{\beta_{h2}^k}{k!}. \quad (3.68)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{nouveaux} &= P_{inter} + \\
 &\quad P(i = C - C_{h1}, \quad 0 \leq j \leq C - C_{h2} \quad \text{et} \quad 0 \leq k \leq C_{h1} - j) \\
 &= P_{inter} + \\
 &\quad \frac{(A(1 - \beta_{h1} - \beta_{h2}))^{(C-C_{h1})}}{K(C - C_{h1})!} \sum_{j=0}^{C-C_{h2}} \sum_{k=0}^{C_{h1}-j-1} \frac{A^{j+k}\beta_{h1}^j}{j!} \frac{\beta_{h2}^k}{k!} \quad (3.69)
 \end{aligned}$$

En partant de la relation 3.49, on peut écrire :

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{inter} = 1 - \frac{\sum_{i=0}^{C-C_{h1}} \sum_{j=0}^{C-C_{h2}} \sum_{k=1}^{C-(i+j)} kP(i,j,k)}{\beta_{h2}A} \\ P_{intra} = 1 - \frac{\sum_{i=0}^{C-C_{h1}} \sum_{j=1}^{C-C_{h2}} \sum_{k=0}^{C-(i+j)} jP(i,j,k)}{\beta_{h1}A} \\ P_{nouveaux} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{C-C_{h1}} \sum_{j=0}^{C-C_{h2}} \sum_{k=0}^{C-(i+j)} iP(i,j,k)}{(1 - (\beta_{h1} - \beta_{h2}))A} \end{array} \right. \quad (3.70)$$

À partir de ces équations, P_{inter} devient égale à :

$$\begin{aligned} P_{inter} &= 1 - \frac{1}{\beta_{h2}A} \sum_{i=0}^{C-C_{h1}} \sum_{j=0}^{C-C_{h2}} \sum_{k=1}^{C-(i+j)} kP(i,j,k) \\ &= 1 - \frac{1}{\beta_{h2}A} \sum_{i=0}^{C-C_{h1}} \sum_{j=0}^{C-C_{h2}} \sum_{l=0}^{C-(i+j)-1} (l+1)P(i,j,l+1) \\ &= 1 - \frac{1}{\beta_{h2}A} \sum_{i=0}^{C-C_{h1}} \sum_{j=0}^{C-C_{h2}} \sum_{l=0}^{C-(i+j)-1} \beta_{h2}AP(i,j,l) \\ &= 1 - \sum_{i=0}^{C-C_{h1}} \sum_{j=0}^{C-C_{h2}} \sum_{l=0}^{C-(i+j)-1} P(i,j,l) \\ &= \sum_{i=0}^{C-C_{h1}} \sum_{j=0}^{C-C_{h2}} P(i,j,C-(i+j)) \\ &= \frac{A^C}{K} \sum_{i=0}^{C-C_{h1}} \sum_{j=0}^{C-C_{h2}} \frac{(1 - \beta_{h1} - \beta_{h2})^i}{i!} \frac{\beta_{h1}^j}{j!} \frac{\beta_{h2}^{C-(i+j)}}{(C-(i+j))!} \\ &= P_3. \end{aligned} \quad (3.71)$$

P_{intra} devient égale à :

$$P_{intra} = 1 - \frac{1}{\beta_{h1}A} \sum_{i=0}^{C-C_{h1}} \sum_{j=1}^{C-C_{h2}} \sum_{k=0}^{C-(i+j)} jP(i,j,k)$$

$$\begin{aligned}
&= 1 - \frac{1}{\beta_{h1} A} \sum_{i=0}^{C-C_{h1}} \sum_{l=0}^{C-C_{h2}-1} \sum_{k=0}^{C-(i+l)-1} (l+1) P(i, l+1, k) \\
&= 1 - \frac{1}{\beta_{h1} A} \sum_{i=0}^{C-C_{h1}} \sum_{l=0}^{C-C_{h2}-1} \sum_{k=0}^{C-(i+l)-1} \beta_{h1} A P(i, l, k) \\
&= 1 - \sum_{i=0}^{C-C_{h1}} \sum_{l=0}^{C-C_{h2}-1} \sum_{k=0}^{C-(i+l)-1} P(i, l, k) \\
&= \sum_{i=0}^{C-C_{h1}} \sum_{j=0}^{C-C_{h2}} P(i, j, C-(i+j)) + \sum_{i=0}^{C-C_{h1}} \sum_{k=0}^{C_{h2}-i-1} P(i, C-C_{h2}, k) \\
&= P_3 + \frac{(A\beta_{h1})^{(C-C_{h2})}}{K(C-C_{h2})!} \sum_{i=0}^{C-C_{h1}} \sum_{k=0}^{C_{h2}-i-1} \frac{A^{i+k}(1-\beta_{h1}-\beta_{h2})^i}{i!} \frac{\beta_{h2}^k}{k!} \\
&= P_{inter} + P_2.
\end{aligned} \tag{3.72}$$

$P_{nouveaux}$ est égale à :

$$\begin{aligned}
P_{nouveaux} &= 1 - \frac{1}{(1-(\beta_{h1}+\beta_{h2}))A} \sum_{i=1}^{C-C_{h1}} \sum_{j=1}^{C-C_{h2}} \sum_{k=0}^{C-(i+j)} i P(i, j, k) \\
&= 1 - \\
&\quad \frac{1}{(1-(\beta_{h1}+\beta_{h2}))A} \sum_{l=0}^{C-C_{h1}-1} \sum_{j=0}^{C-C_{h2}} \sum_{k=0}^{C-(l+j)-1} (l+1) P(l+1, j, k) \\
&= 1 - \\
&\quad \frac{(1-(\beta_{h1}+\beta_{h2}))A}{(1-(\beta_{h1}+\beta_{h2}))A} \sum_{l=0}^{C-C_{h1}-1} \sum_{j=0}^{C-C_{h2}} \sum_{k=0}^{C-(l+j)-1} P(l, j, k) \\
&= 1 - \\
&\quad \sum_{l=0}^{C-C_{h1}-1} \sum_{j=0}^{C-C_{h2}} \sum_{k=0}^{C-(l+j)-1} P(l, j, k) \\
&= \sum_{l=0}^{C-C_{h1}} \sum_{j=0}^{C-C_{h2}} P(l, j, C-(l+j)) + \\
&\quad \sum_{j=0}^{C-C_{h2}} \sum_{k=0}^{C_{h1}-j-1} P(C-C_{h1}, j, k) \\
&= P_3 + \frac{(A(1-\beta_{h1}-\beta_{h2}))^{(C-C_{h1})}}{K(C-C_{h1})!} \sum_{j=0}^{C-C_{h2}} \sum_{k=0}^{C_{h1}-j-1} \frac{A^{j+k}\beta_{h1}^j\beta_{h2}^k}{j!k!} \\
&= P_{inter} + P_1.
\end{aligned} \tag{3.73}$$

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, trois mesures de performance ont été définies. Ces mesures évaluent la largeur de bande moyenne et le délai moyen de handoff par appel ainsi que la probabilité de blocage d'appels. Deux modèles permettant le calcul de ces mesures de performance ont été proposés. Le premier, basé sur la structure du réseau, permet d'évaluer les moyennes de la largeur de bande et du délai de handoff par appel pour les trois stratégies de handoff considérées dans cette thèse. Le second, basé sur un modèle de trafic, permet le calcul de la probabilité de blocage de nouveaux appels et des appels de handoff pour ces mêmes stratégies de handoff. Une analyse numérique de ces trois critères de performance est présentée dans le prochain chapitre.

CHAPITRE 4

RÉSULTATS NUMÉRIQUES DE L'ÉVALUATION DES MESURES DE PERFORMÂNCÉ

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, on présente une étude comparative entre la stratégie hiérarchique et les stratégies de handoff à deux phases et de réacheminement partiel. Les mesures de comparaison seront dans chacun des cas la largeur de bande et le délai moyens par appel. On présente aussi les résultats relatifs au calcul de la probabilité de blocage de nouveaux appels et des appels de handoff pour ces trois stratégies. La suite du chapitre est organisée en 4 sections. À la section 4.2, nous justifions les raisons du choix des paramètres numériques utilisés. La section 4.3 présente la comparaison des largeurs de bande et des délais moyens des stratégies à deux phases, de réacheminement partiel et hiérarchique. Le calcul de la probabilité de blocage d'appels des trois stratégies fait l'objet de la section 4.4. Finalement, un ensemble de recommandations spécifiant les choix judicieux entre les trois stratégies de handoff considérées dans cette thèse est proposé dans la section 4.5 de ce chapitre.

4.2 Choix des paramètres numériques

Les deux types de trafics, voix et données, seront envisagés. Nous supposons, comme dans le modèle considéré au chapitre 3, que la durée d'appel est subdivisée en intervalles de temps suffisamment courts de sorte qu'un seul handoff puisse se

produire et se terminer pendant cet intervalle. Dans [111], la valeur choisie pour ce temps élémentaire est de 60 millisecondes. Cette hypothèse est plausible puisque le délai de handoff maximal observé jusqu'à présent dans le cadre des différents travaux de recherche sur le handoff dans les réseaux ATM sans fil est inférieur à cette valeur [75, 81, 98, 106].

4.2.1 Choix de paramètres des stratégies de réacheminement partiel et à deux phases

Nous allons considérer un réseau ATM sans fil symétrique¹ dans lequel l'usager mobile est connecté à un point-extémité fixe rattaché au réseau fixe. La figure 4.1 illustre la structure du réseau où le nombre de liens entre le réseau fixe et chaque commutateur connecté à deux cellules radio est égal à $\bar{L} = 7$. Le nombre de liens entre les cellules radio et les commutateur ATM auxquels ces cellule sont rattachées n'est pas pris en considération. En effet, chacun de ces liens est supposé alloué en tout temps pour connecter la station de base au réseau et peut, en général, écouler le trafic des usagers se déplaçant à l'intérieur des cellules et les handoffs. Les autres liens du réseau transportent généralement différents types d'applications provenant de différents réseaux, par exemple un réseau ATM sans fil. Par conséquent, il est intéressant de connaître la largeur de bande moyenne par appel à allouer sur ces liens ainsi que le délai moyen par appel pour les applications du réseau ATM sans fil.

À partir de cette structure, les nombres de liens \bar{L}^p et \bar{L}^r sont égaux à 7. Pour les deux stratégies à deux phases et de réacheminement partiel, nous allons en général considérer la probabilité q_a , qu'il y ait un handoff dans un intervalle de temps, variable. Nous considérons aussi une alternative pour la probabilité d'optimisation du

¹un réseau symétrique est un réseau dans lequel on compte le même nombre de liens et de commutateurs ATM entre le réseau fixe et chacune des cellules radio.

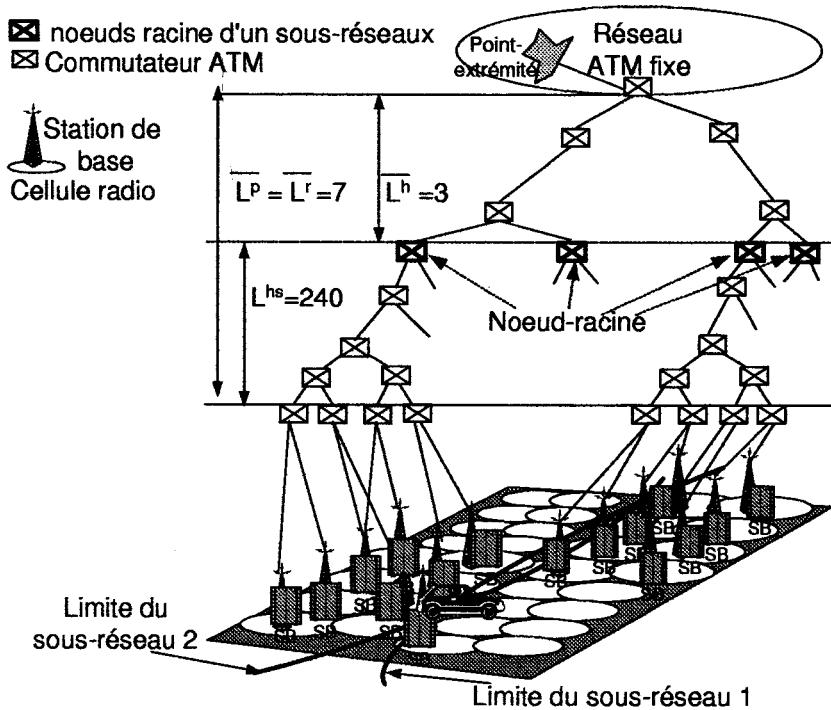


Fig. 4.1 Structure du réseau ATM sans fil

chemin q , variable ou fixé. Nous avons choisi $q = q_a/2$, $q = 0.1$ et $q = 0.7$. La valeur $q = q_a/2$ correspond à une optimisation du chemin déclenchée à tous les deux handoffs et à un nombre moyen de liens entre le commutateur original et le commutateur cible $\bar{H} = 1$.

4.2.2 Choix de paramètres de la stratégie hiérarchique

Deux types de configurations sont considérés pour le réseau donné dans la figure 4.1 :

- la configuration 1, où le nombre moyen de liaisons entre le point-extrémité et la racine d'un sous-réseau $L^h = 3$ et le nombre total de liens dans les sous-réseaux $L^{hs} = 240$;

Paramètres	Cas réalistes			Cas critiques		
q'_a	$0.09q_a$			q_a		
q	$q_a/2$	0.1	0.7	$q_a/2$	0.1	0.7

Tab. 4.1 Paramètres numériques du modèle de calcul de la largeur de bande et du délai moyens

- la configuration 2, où la valeur de $L^h = 1$ et le nombre total de liens dans les sous-réseaux $L^{hs} = 252$.

Nous considérons aussi, pour chacune des configurations, deux scénarios de handoffs :

- le cas dit réaliste où les handoffs inter sous-réseaux sont moins fréquents que les handoffs intra sous-réseaux. Dans ce cas, la probabilité qu'il y ait un handoff inter sous-réseaux q'_a est choisie égale à $0.09 \times q_a$ (voir annexe IV),
- le cas critique où tous les évènements de handoffs sont concentrés à la périphérie des sous-réseaux. Dans ce cas, la probabilité du handoff inter sous-réseaux est élevée : $q'_a = q_a$.

Les différents cas que nous allons analyser, pour les configurations 1 et 2, sont résumés dans le tableau 4.1.

4.2.3 Choix des paramètres communs aux trois stratégies

Pour chacune de ces stratégies, la durée moyenne d'un appel est choisie d'une manière aléatoire à partir d'une distribution uniforme. Pour le trafic voix, cette durée est choisie entre 60 et 120 secondes et entre 900 et 1200 secondes pour le trafic de données. On propose d'étudier les rapports b_i/b_{RP} et d_i/d_{RP} où $i = p, s, h$ pour les équations 3.17, 3.24, 3.32, 3.36, 3.39 et 3.40. Dans ces rapports, on retrouve les ratios suivants : b/b_{RP} , b_{EC}/b_{RP} , d/d_{RP} et d_{EC}/d_{RP} . Rappelons que :

- b est la largeur de bande requise par appel sur un lien de connexion ;
- b_{RP} est la largeur de bande requise par la signalisation pour chaque réacheminement partiel ;
- B_{EC} est la largeur de bande requise par la signalisation pour chaque extension du chemin ;
- d le temps nécessaire pour réservé la largeur de bande b sur une liaison du nouveau chemin étendu et/ou partiel d'un appel ;
- d_{RP} le délai impliqué par la signalisation pour chaque réacheminement partiel ;
- d_{EC} le délai de la signalisation pour chaque extension du chemin.

Par exemple, nous choisirons $b_{EC}/b_{RP} = d_{EC}/d_{RP} = 0.2$, car la largeur de bande de signalisation pour l'extension du chemin est en général plus faible que celle du réacheminement partiel ($b_{RP} > b_{EC}$). Nous considérons aussi, en nous appuyant sur l'étude d'Akyol et Cox [33], que $b_{RP} > b$ et $d_{RP} > d$. D'après [33], la largeur de bande moyenne pour un handoff est $b_{RP} = 120$ kb/s et si nous considérons que $b = 64$ kb/s, ceci conduit à fixer $b/b_{RP} = 0.5$. Pour des valeurs de largeur de bande $b > 64$ kb/s, le rapport b/b_{RP} sera supérieur à 0.5. Nous avons donc choisi les valeurs $b/b_{RP} = 0.5$ et 0.8 pour notre étude. À titre d'exemple, la valeur 0.8 représente le cas où :

- les liens réseau de vitesse supérieure à 64 Kb/s, par exemple $b = 96$ Kb/s. Ces liens peuvent être utilisés pour un trafic de données ; ou,
- les messages de signalisation de handoff nécessitant une largeur de bande b_{RP} moindre que celle utilisée par Akyol et Cox, par exemple $b_{RP} = 80$ Kb/s.

La condition $d_{RP} > d$ est toujours vérifiée car le délai d pour la réservation de ressources entre deux nœuds consécutifs est plus faible que le délai d_{RP} pour la signalisation du handoff. Les valeurs $d/d_{RP} = 0.5$ et $d/d_{RP} = 0.8$ ont été choisies pour le calcul du délai moyen. Le choix de valeurs proposées ci-haut, pour b/b_{RP} et

d/d_{RP} , s'appliquent aux trois stratégies en partant de l'hypothèse qu'elles utilisent le même protocole de réacheminement de la connexion.

Pour le calcul de la probabilité de blocage d'appels, nous avons choisi pour les modèles à deux phases et hiérarchique les valeurs suivantes :

- un nombre total de canaux $C = 50$ et un trafic total offert $A = 35$ Erlang,
- un nombre total de canaux $C = 100$ et un trafic total offert $A = 70$ Erlang.

Pour le modèle à deux phases, C_h et β sont variables. Pour le modèle hiérarchique, les rapports de trafics de handoffs intra et inter sous-réseaux β_{h1} et β_{h2} ainsi que C_{h1} et C_{h2} sont variables.

Rappelons que la probabilité de blocage d'appels de la stratégie de réacheminement partiel est égale à celle de la stratégie à deux phases. Ainsi, les résultats de la probabilité de blocage d'appels obtenus pour la stratégie à deux phases s'appliquent à celle de réacheminement partiel.

4.3 Largeur de bande et délai moyens par appel

Nous proposons d'évaluer la largeur de bande par appel pour chacune des stratégies de handoff. Les résultats de la stratégie hiérarchique seront comparés avec ceux obtenus pour les stratégies à deux phases et de réacheminement partiel. Nous proposons aussi d'évaluer le délai moyen pour chacune des stratégies et de comparer le délai de la stratégie hiérarchique avec celui obtenu pour les deux autres stratégies.

4.3.1 Exemple de résultats

Un exemple de résultats est illustré par la figure 4.2 qui montre la variation de la largeur de bande moyenne par appel des stratégies à deux phases et hiérarchique normalisée à b_{RP} . Nous constatons que la largeur de bande moyenne par appel de la stratégie hiérarchique est plus faible que celle de la stratégie à deux phases. Cette largeur de bande est une mesure de performance qu'un opérateur de réseau ATM sans fil peut utiliser. Elle permet de déterminer la quantité de ressources à déployer dans le réseau pour desservir un certain nombre d'usagers. La stratégie hiérarchique est la méthode de gestion de handoff recherchée par cet opérateur. En effet, elle permet de réduire le coût du réseau en terme de ressources à déployer comparativement à la stratégie à deux phases.

Dans la figure 4.2, nous remarquons une différence de comportement de la largeur de bande de la stratégie à deux phases entre les intervalles $q_a \leq 0.2$ et $0.2 \leq q_a \leq 1$ (croissant dans l'intervalle $q_a \leq 0.2$ et décroissant dans l'intervalle $0.2 \leq q_a \geq 1$). Cette différence est due au fait que sur l'intervalle $q_a \leq 0.2$, la méthode à deux phases utilise l'extension du chemin avec une faible probabilité q d'optimisation, ce qui entraîne une largeur de bande moyenne supérieur à celle calculée dans l'intervalle $0.2 \leq q_a \leq 1$. La figure 4.3 illustre la variation du rapport \bar{b}_p/b_{RP} de la stratégie à deux phases pour différentes valeurs de q . Nous constatons que plus q est faible, plus la largeur de bande moyenne dans l'intervalle $q_a \geq 0.2$ est élevée.

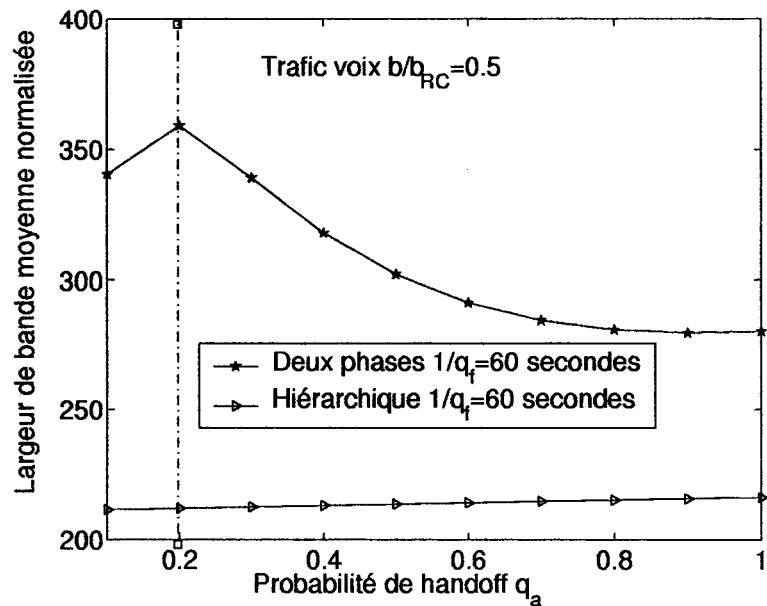


Fig. 4.2 \bar{b}_p/b_{RP} et \bar{b}_h/b_{RP} pour le trafic de voix : cas réaliste avec $b/b_{RP} = 0.5$, $\bar{L}^r = \bar{L}^p = 7$, $\bar{L}^h = 3$, $L^{hs} = 240$ et q variable

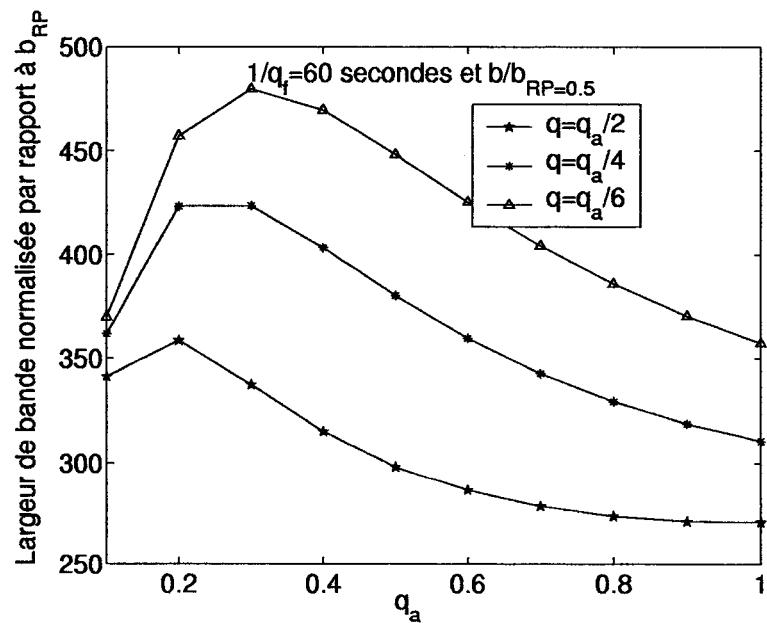


Fig. 4.3 Variation de \bar{b}_p/b_{RP} pour différentes valeurs de q pour le trafic de voix : cas réaliste avec $b/b_{RP} = 0.5$, $\bar{L}^r = \bar{L}^p = 7$, $\bar{L}^h = 3$, $L^{hs} = 240$ et q variable

4.3.2 Résultats de la largeur de bande moyenne par appel

4.3.2.1 Méthode de comparaison

Dans un but de synthèse, nous allons présenter les rapports de largeurs de bande moyennes \bar{b}_p/\bar{b}_h^2 et \bar{b}_s/\bar{b}_h^3 , ainsi que des délais moyens \bar{d}_p/\bar{d}_h et \bar{d}_s/\bar{d}_h . Ces rapports ont l'avantage de permettre une lecture simple et directe des différences de performance entre les trois stratégies.

4.3.2.2 Résultats du cas réaliste de la configuration 1 où q est variable

Les figures 4.4 et 4.5 montrent la variation des rapports de largeurs de bande moyennes par appel pour le trafic voix et les figures 4.6 et 4.7 pour le trafic de données.

Les valeurs rapportées dans le tableau 4.2 représentent la moyenne arithmétique des rapports \bar{b}_p/\bar{b}_h et \bar{b}_s/\bar{b}_h sur l'ensemble des valeurs de q_a . Notons que dans ce tableau, les valeurs $b/b_{RP} < 0.5$ n'ont pas été considérées. Cependant, des calculs de la largeur de bande moyenne par appel dans cet intervalle ont été effectués. Ils révèlent que la largeur de bande moyenne par appel de la stratégie hiérarchique est plus faible que celles des stratégies à deux phases et de réacheminement partiel. Dans cette thèse, seuls les résultats pour $b/b_{RP} \geq 0.5$ sont donnés. Ces résultats représentent les cas défavorables pour la stratégie hiérarchique où les rapports entre les largeurs de bande \bar{b}_p/\bar{b}_h et \bar{b}_s/\bar{b}_h sont plus petits que ceux obtenus pour les valeurs $b/b_{RP} < 0.5$. De plus, ils représentent des cas réalisistes pour les choix de valeurs de largeurs de bande b et b_{RP} sur la base de l'étude faite par Akyol et Cox [33].

²L'indice p fait référence à la stratégie à deux phases et l'indice h à la stratégie hiérarchique.

³L'indice s fait référence à la stratégie de réacheminement partiel.

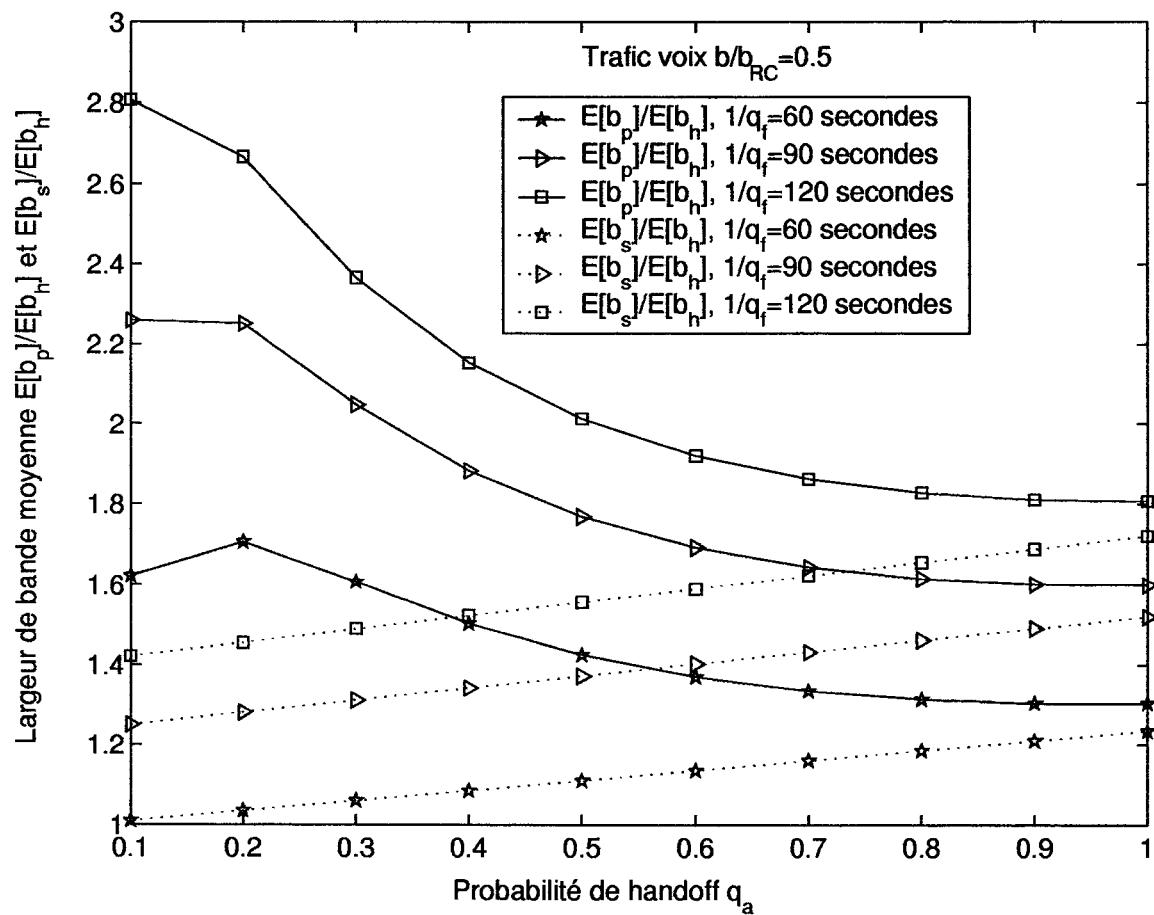


Fig. 4.4 Rapports $\overline{b_p}/\overline{b_h}$ et $\overline{b_s}/\overline{b_h}$ pour le trafic de voix : cas réaliste avec $b/b_{RP} = 0.5$, $\overline{L^r} = \overline{L^p} = 7$, $\overline{L^h} = 3$, $L^{hs} = 240$

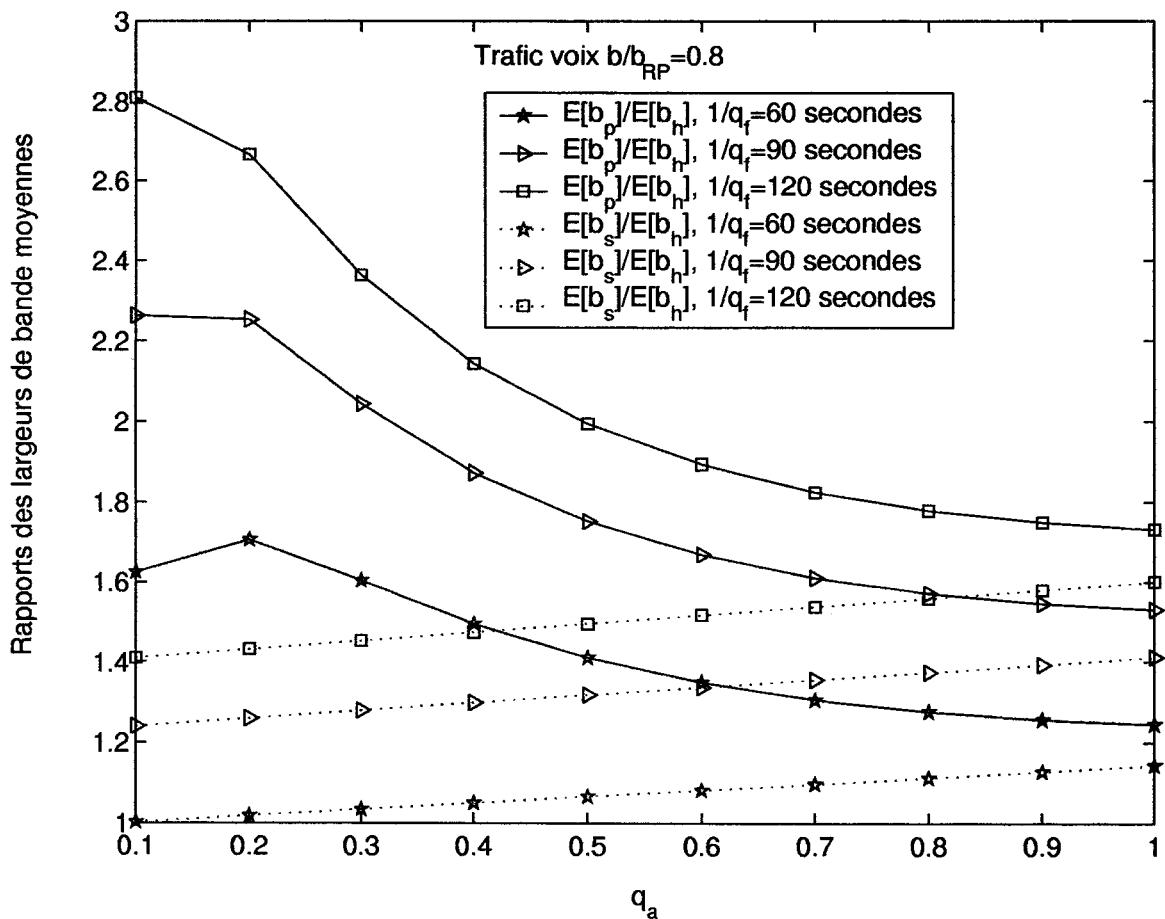


Fig. 4.5 Rapports $\overline{b_p}/\overline{b_h}$ et $\overline{b_s}/\overline{b_h}$ pour le trafic de voix : cas réaliste avec $b/b_{RP} = 0.8$, $\overline{L^r} = \overline{L^p} = 7$, $\overline{L^h} = 3$, $L^{hs} = 240$

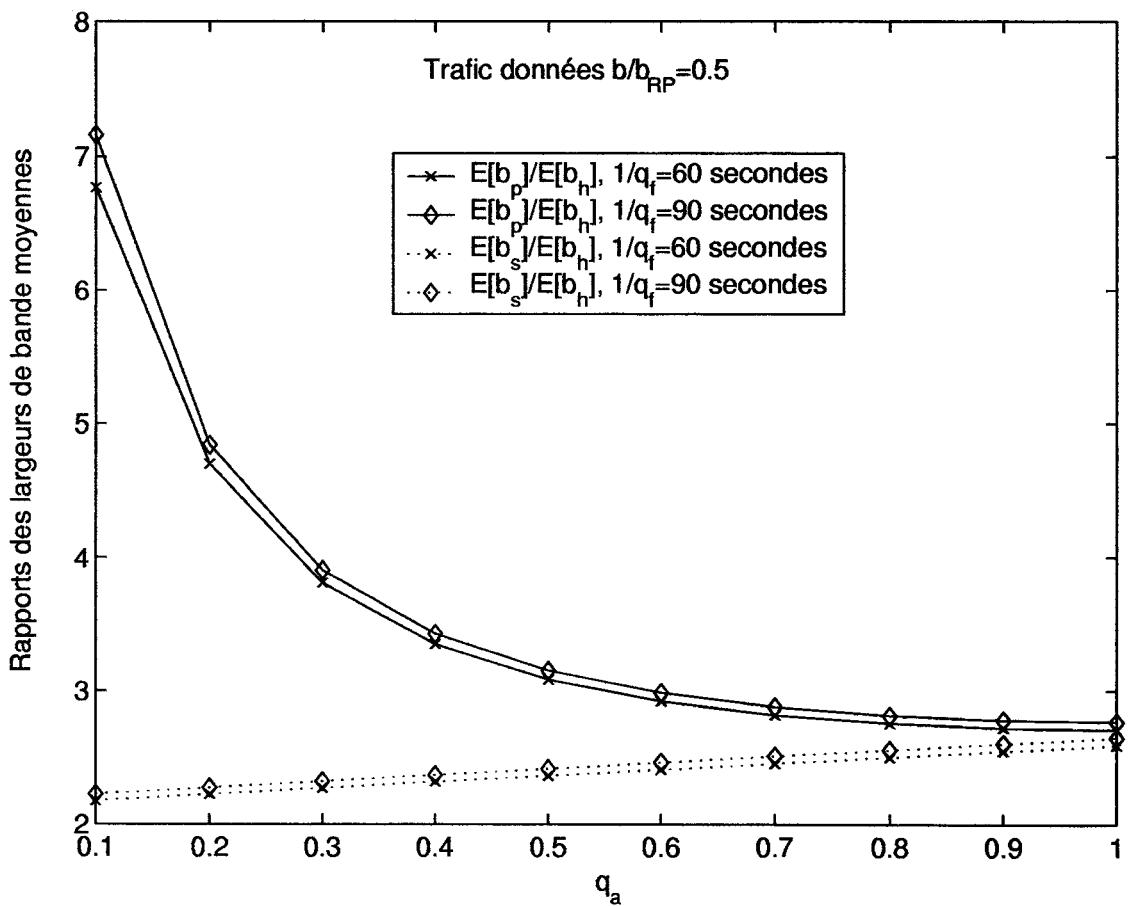


Fig. 4.6 Rapports \bar{b}_p/\bar{b}_h et \bar{b}_s/\bar{b}_h pour le trafic de données : cas réaliste avec $b/b_{RP} = 0.5$, $\bar{L}^r = \bar{L}^p = 7$, $\bar{L}^h = 3$, $L^{hs} = 240$

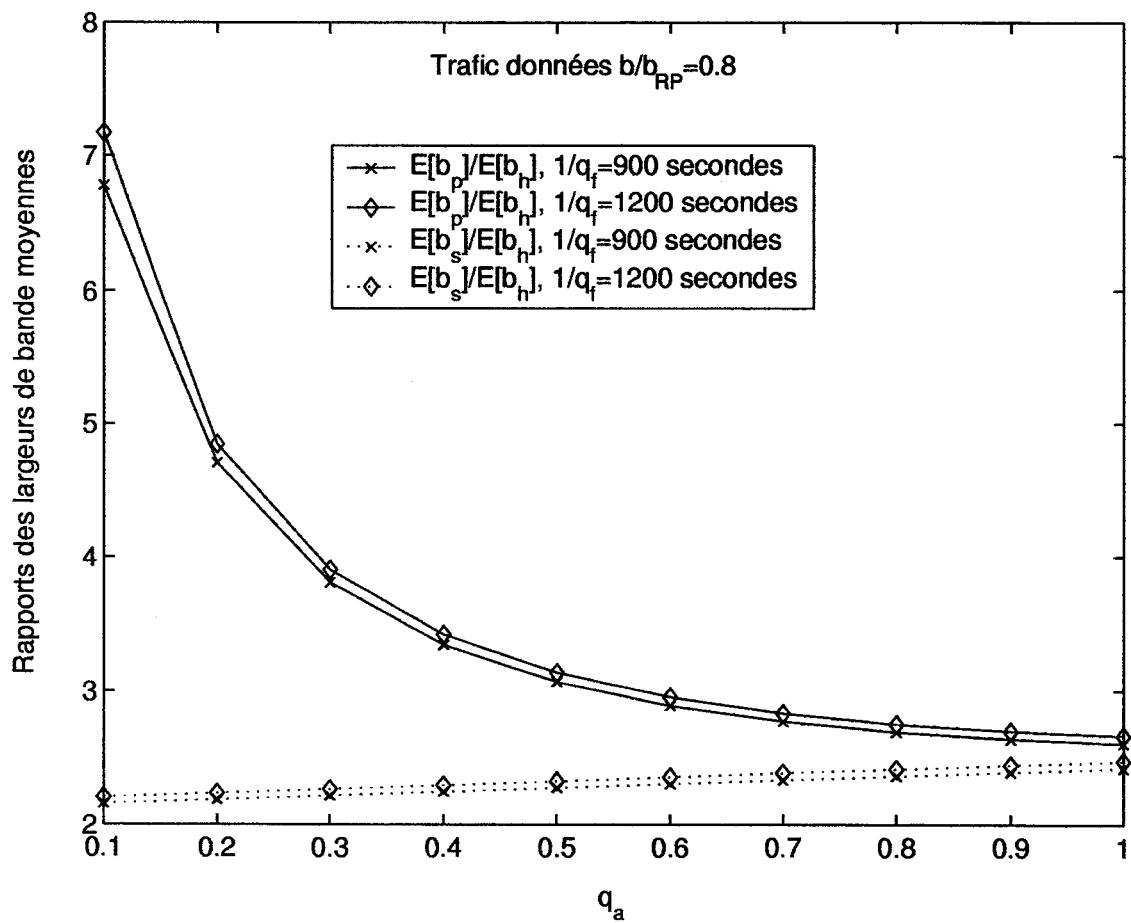


Fig. 4.7 Rapports $\overline{b_p}/\overline{b_h}$ et $\overline{b_s}/\overline{b_h}$ pour le trafic de données : cas réaliste avec $b/b_{RP} = 0.58$, $\overline{L^r} = \overline{L^p} = 7$, $\overline{L^h} = 3$, $L^{hs} = 240$

Comparaison des stratégies de handoff : cas réaliste	Paramètres de performance : largeur de bande moyenne			
	Trafic de voix pour $b/b_{RP} =$		Trafic de données pour $b/b_{RP} =$	
	0.5	0.8	0.5	0.8
stratégie à deux phases/ stratégie hiérarchique	1.80	1.77	3.62	3.59
stratégie de réacheminement partiel / stratégie hiérarchique	1.36	1.30	2.41	2.32

Tab. 4.2 Largeur de bande moyenne pour le cas réaliste : q variable et $\overline{L^h} = 3$

Les résultats montrent que, pour le trafic voix, la largeur de bande moyenne par appel de la stratégie hiérarchique est jusqu'à environ 2 fois plus faible que celle de la stratégie de handoff à deux phases. Le facteur est supérieur à 3 pour le trafic de données. Cette largeur de bande est légèrement plus faible que celle de la stratégie de réacheminement partiel pour le trafic voix. Le facteur de gain est supérieur à 2 pour le trafic de données. Ainsi, la stratégie hiérarchique permet de réduire le coût, en terme de ressources réseau, de déploiement d'un réseau ATM sans fil comparativement aux stratégies à deux phases et de réacheminement partiel.

4.3.2.3 Résultats du cas réaliste de la configuration 2 où q est variable

Considérons maintenant le cas où des ressources sont réservées sur presque tous les liens du réseau hiérarchique ($\overline{L^h} = 1$ avec $\overline{L^r} = \overline{L^p} = 7$). Les résultats sont résumés dans le tableau 4.3 qui montrent que la largeur de bande de la stratégie hiérarchique est plus faible que celle des deux autres stratégies de handoff pour les trafics de voix

Comparaison des stratégies de handoff : cas réaliste	Paramètres de performance : largeur de bande moyenne			
	Trafic de voix pour $b/b_{RP} =$		Trafic de données pour $b/b_{RP} =$	
	0.5	0.8	0.5	0.8
stratégie à deux phases / stratégie hiérarchique	2.66	2.64	8.95	9
stratégie de réacheminement partiel / stratégie hiérarchique	2	1.93	5.93	5.79

Tab. 4.3 Largeur de bande moyenne pour le cas réaliste : q variable et $\overline{L^h} = 1$

et de données. Le gain est respectivement de 9 et $\cong 6$ pour le trafic de données et est ≥ 2 pour le trafic de voix.

4.3.2.4 Résultats du cas réaliste de la configuration 1 et 2 où q est fixé

Considérons maintenant le cas où la probabilité q est fixé pour $\overline{L^p} = \overline{L^r} = 7$, $\overline{H} = 1$ et $\overline{L^h} = 3$ et $\overline{L^h} = 1$. Nous constatons que la largeur de bande de la stratégie hiérarchique est plus faible que celle de la stratégie à deux phases pour $q = 0.1$ et $q = 0.7$ (voir tableau 4.4). Cette différence est d'autant plus grande que la probabilité q est faible car l'optimisation du chemin est moins fréquemment utilisée.

Comparaison stratégie à deux phases/ stratégie hiérarchique		Paramètres de performance : largeur de bande moyenne			
Paramètres	Probabilité q	Trafic de voix pour $b/b_{RP} =$		Trafic de données pour $b/b_{RP} =$	
		0.5	0.8	0.5	0.8
$L^h = 3, \bar{L}^r = 7$ et $\bar{L}^p = 7$	$q = 0.1$	2.43	2.43	4.79	4.81
	$q = 0.7$	1.42	1.37	2.51	2.43
$L^h = 1, \bar{L}^r = 7$ et $\bar{L}^p = 7$	$q = 0.1$	3.59	3.60	11.79	12.03
	$q = 0.7$	2.10	2.03	6.16	6.06

Tab. 4.4 Performances des stratégies de handoff pour le cas réaliste : q fixé

4.3.2.5 Résultats du cas critique de la configuration 1 et 2 où q est variable

Pour ce cas critique, nous allons considérer que les évènements de handoff inter sous-réseaux sont plus fréquents que les handoffs intra sous-réseaux avec une probabilité d'optimisation du chemin q variable. Les rapports de largeurs de bande des différentes stratégies de handoff sont illustrés dans les figures 4.8, 4.9, 4.10 et 4.11 en fonction de q_a . Les moyennes arithmétiques sur q_a des rapports sont résumées dans le tableau 4.5. La largeur de bande de la stratégie hiérarchique est plus faible que celles des stratégies à deux phases et de réacheminement partiel. Cependant, comparées au cas réaliste, ces différences de largeurs de bande sont moins marquées. Ceci est dû au fait que le réacheminement partiel est plus fréquemment utilisé puisque la probabilité des handoffs inter sous-réseaux q'_a est élevée.

4.3.2.6 Résultats du cas critique de la configuration 1 et 2 où q est fixé

En plus de considérer des handoffs inter sous-réseaux plus fréquents que les handoffs intra sous-réseaux, nous considérons aussi que la probabilité d'optimisation du

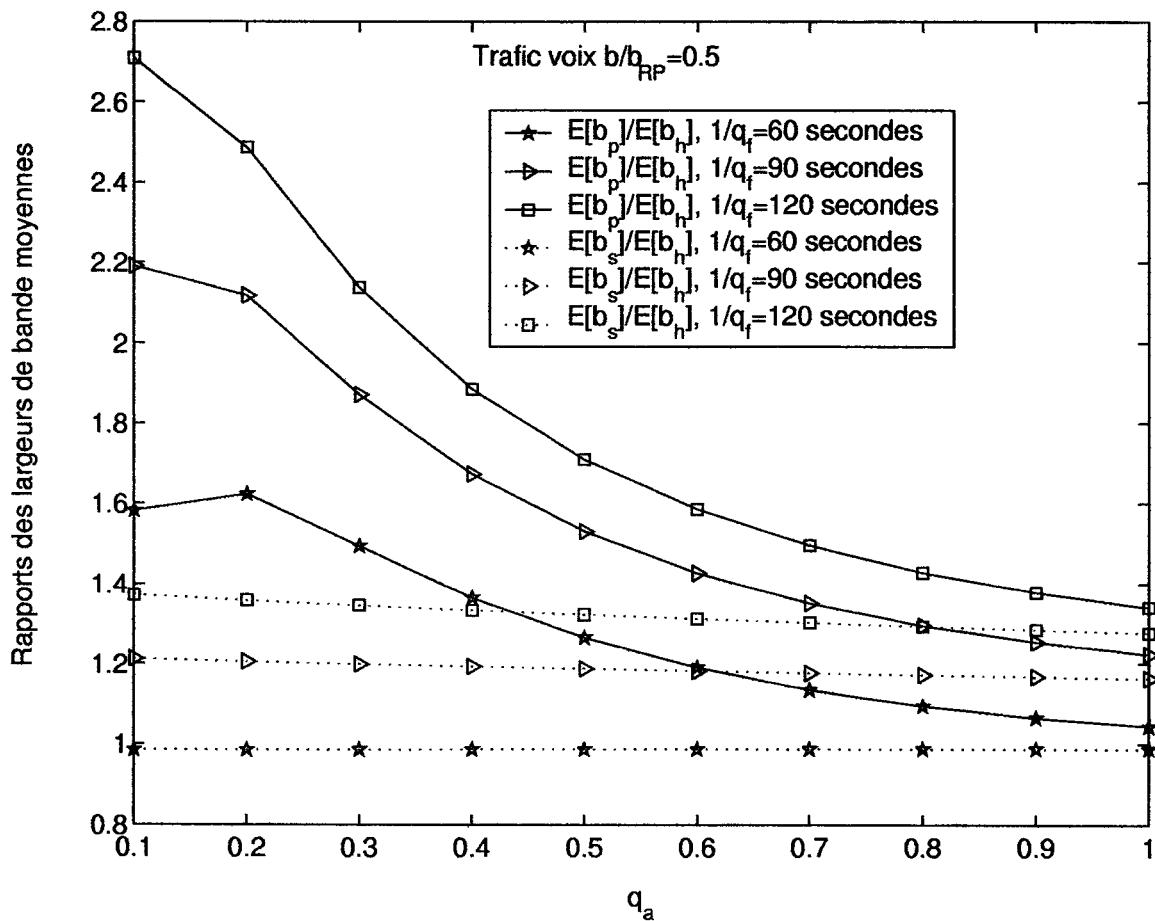


Fig. 4.8 Rapports \bar{b}_p/\bar{b}_h et \bar{b}_s/\bar{b}_h pour le trafic de voix, cas q variable : $b/b_{RP} = 0.5$, $\bar{L}^r = \bar{L}^p = 7$, $\bar{L}^h = 1$, $L^{hs} = 60$

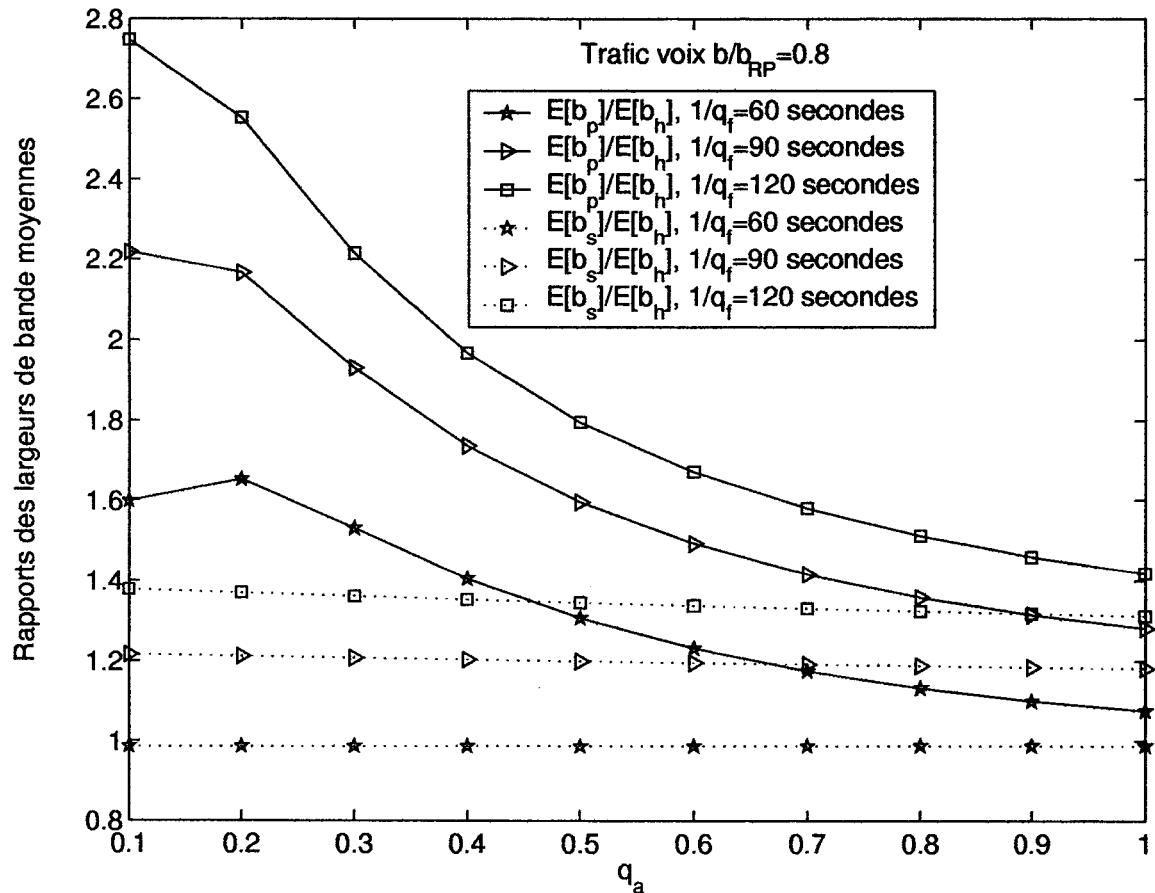


Fig. 4.9 Rapports $\overline{b_p}/\overline{b_h}$ et $\overline{b_s}/\overline{b_h}$ pour le trafic de voix, cas q variable : $b/b_{RP} = 0.8$, $\overline{L^r} = \overline{L^p} = 7$, $\overline{L^h} = 1$, $L^{hs} = 60$

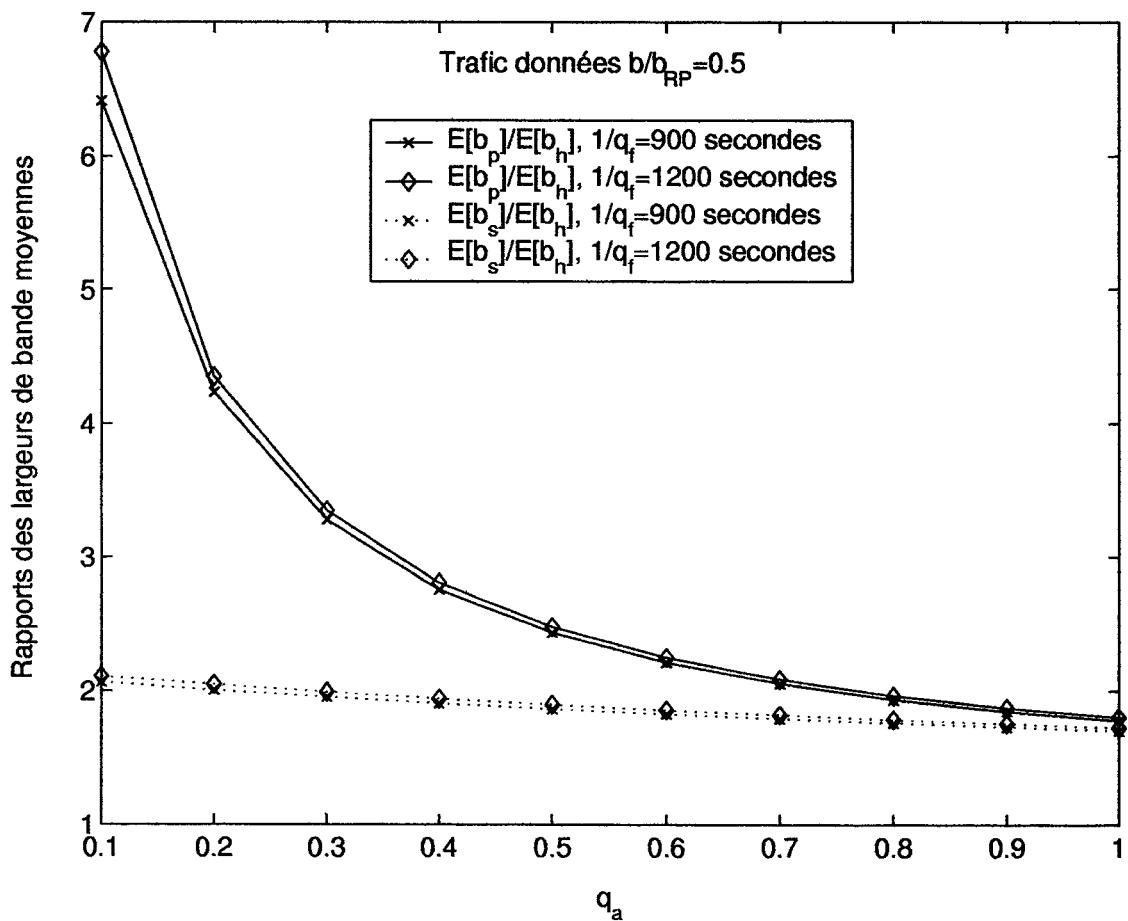


Fig. 4.10 Rapports $\overline{b_p}/\overline{b_h}$ et $\overline{b_s}/\overline{b_h}$ pour le trafic de données, cas q variable : $b/b_{RP} = 0.5$, $\overline{L^r} = \overline{L^p} = 7$, $\overline{L^h} = 1$, $L^{hs} = 60$

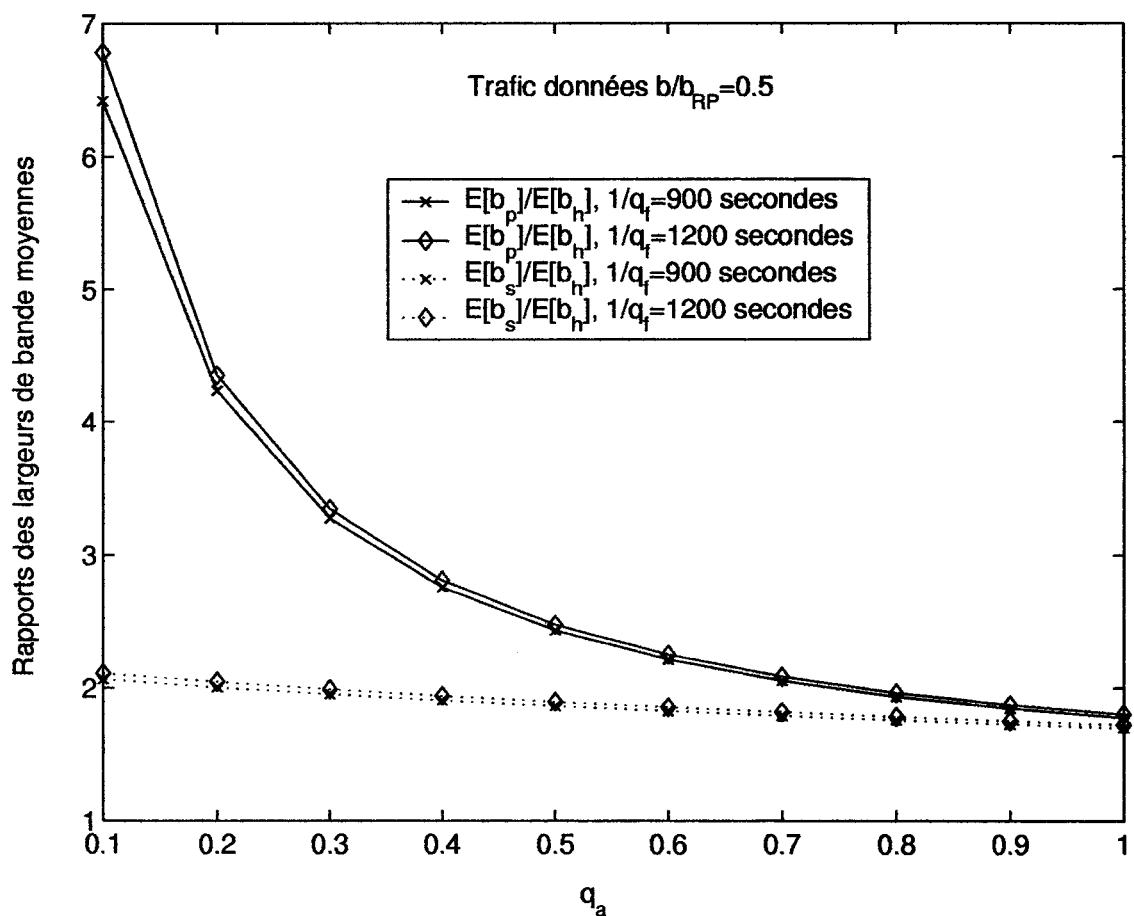


Fig. 4.11 Rapports $\overline{b_p}/\overline{b_h}$ et $\overline{b_s}/\overline{b_h}$ pour le trafic de données, cas q variable : $b/b_{RP} = 0.8$, $\overline{L^r} = \overline{L^p} = 7$, $\overline{L^h} = 1$, $L^{hs} = 60$

Paramètres choisis	Comparaison des stratégies de handoff : cas q variable	Paramètres de performance : largeur de bande moyenne			
		Trafic de voix pour $b/b_{RP} =$		Trafic de données pour $b/b_{RP} =$	
		0.5	0.8	0.5	0.8
$L^h = 3$, $\overline{L^r} = 7$ et $\overline{L^p}=7$	stratégie à deux phases/ stratégie hiérarchique	1.56	1.62	2.93	3.12
	stratégie de réacheminement partiel / stratégie hiérarchique	1.16	1.18	1.87	1.96
$L^h = 1$, $\overline{L^r} = 7$ et $\overline{L^p}=7$	stratégie à deux phases / stratégie hiérarchique	2.18	2.30	5.87	6.66
	stratégie de réacheminement partiel / stratégie hiérarchique	1.60	1.66	3.58	4

Tab. 4.5 Largeur de bande moyenne pour le cas critique : q variable

chemin q est fixée. Les performances de ces trois stratégies, reportées dans le tableau 4.6, révèlent que la largeur de bande de la stratégie hiérarchique est plus faible que celle des stratégies à deux phases et de réacheminement partiel. Cette différence est d'autant plus élevée que q est faible car quand q est faible, l'optimisation du chemin est moins utilisée pour la stratégie à deux phases. Comparée au cas réaliste, cette différence de largeurs de bande est d'autant plus faible que q est grand. En effet, quand q est grand, l'optimisation du chemin est plus fréquemment utilisée pour la stratégie à deux phases. De plus, le réacheminement de la connexion est plus fréquent ($q'_a = q_a$) pour la stratégie hiérarchique.

Comparaison : Stratégie à deux phases/ stratégie hiérarchique		Paramètres de performance : largeur de bande moyenne			
Paramètres	Probabilité q	Trafic de voix pour $b/b_{RP} =$		Trafic de données pour $b/b_{RP} =$	
		0.5	0.8	0.5	0.8
$L^h = 3$, $\bar{L}^r = 7$ et $\bar{L}^p = 7$	$q = 0.1$	2.07	2.19	3.75	4.07
	$q = 0.7$	1.22	1.24	1.95	2.05
$L^h = 1$, $\bar{L}^r = 7$ et $\bar{L}^p = 7$	$q = 0.1$	2.87	3.10	7.20	8.43
	$q = 0.7$	1.68	1.75	3.73	4.23

Tab. 4.6 La largeur de bande moyenne pour le cas critique : cas q fixé

4.3.2.7 Analyse des résultats

Dans les différents cas de figures proposés ci-dessus, les résultats obtenus révèlent que la stratégie hiérarchique utilise une largeur de bande moyenne par appel plus faible que celles des stratégies à deux phases et de réacheminement partiel. En conséquence, nous constatons que la réservation de ressources combinée avec un réacheminement partiel permet de réduire la largeur de bande moyenne par appel. De plus, même si le nombre de liens réservés augmente, cette largeur de bande reste faible par rapport à celles des stratégies à deux phases et de réacheminement partiel.

4.3.3 Résultats du délai moyen par appel

4.3.3.1 Résultats du cas réaliste de la configuration 1 et 2 où q est variable

Les valeurs des rapports des délais moyens par appel des stratégies à deux phases, hiérarchique et de réacheminement partiel sont résumées dans le tableau 4.7. Nous

Paramètres choisis	Comparaison des stratégies de handoff : cas réaliste	Paramètres de performance :	
		délai moyen	Trafic de voix et de données pour
		$d/d_{RP} = 0.5$	$d/d_{RP} = 0.8$
$L^h = 3$, $\overline{L^p} = 7$ et $\overline{L^r} = 7$	stratégie à deux phases/ la stratégie hiérarchique	8	8.48
	stratégie de réacheminement partiel / la stratégie hiérarchique	20	21.57
$L^h = 1$, $\overline{L^p} = 7$ et $\overline{L^r} = 7$	stratégie à deux phases/ la stratégie hiérarchique	13.33	16
	stratégie de réacheminement partiel / la stratégie hiérarchique	33.33	40.74

Tab. 4.7 Délai de handoffs pour le cas réaliste : q variable

constatons que le délai de la stratégie hiérarchique est plus faible que celui des stratégies à deux phases et de réacheminement partiel. Le gain est de 8 par rapport à la stratégie à deux phases et de 21 par rapport à la stratégie de réacheminement partiel pour la configuration 1. Cette différence de délai étant encore plus grande si nous considérons le cas de la configuration 2 où le gain atteint 40 (voir le tableau 4.7). Ce résultat était prévu car pour la stratégie hiérarchique, le réacheminement de la connexion se fait sur un chemin plus court que celui des stratégies à deux phases et de réachememinent partiel.

4.3.3.2 Résultats du cas réaliste de la configuration 1 et 2 où q est fixé

En considérant la probabilité q fixée, nous constatons que plus q est élevé, plus le délai moyen par appel de la stratégie hiérarchique est faible par rapport à la stratégie à deux phases (voir le tableau 4.8). En effet, plus la fréquence d'utilisation de l'optimisation du chemin est grande plus le délai moyen par appel de la stratégie à deux phases devient élevé.

Comparaison stratégie hiérarchique sur stratégie à deux phases		Paramètres de performance : délai moyen moyenne			
Paramètres	Probabilité q	Trafic de voix pour $d/d_{RP} =$		Trafic de données pour $d/d_{RP} =$	
		0.5	0.8	0.5	0.8
$L^h = 3, \bar{L}^r = 7$ et $\bar{L}^p = 7$	$q = 0.1$	4.88	5.16	4.88	5.16
	$q = 0.7$	15.55	16.53	15.55	16.53
$L^h = 1, \bar{L}^r = 7$ et $\bar{L}^p = 7$	$q = 0.1$	2.87	1.49	7.20	8.43
	$q = 0.7$	1.68	1.49	3.73	4.24

Tab. 4.8 Délai de handoffs pour le cas réaliste : q fixé

4.3.3.3 Résultats du cas critique de la configuration 1 et 2 où q est variable

On considérées ici les mêmes hypothèses que celles décrites dans la section 4.3.2.5.

Les valeurs des rapports de délais moyens par appel sont résumées dans le tableau 4.9.

Nous constatons que le délai moyen par appel de la stratégie hiérarchique est plus faible que celui de la stratégie de réacheminement partiel. Pour la configuration 1, ce délai est plus élevé que celui de la stratégie à deux phases car non seulement le réacheminement de la connexion, pour la stratégie hiérarchique, est plus fréquent ($q'_a = q_a$) mais aussi le nombre de liens de réacheminement \bar{L}^h est plus élevé que celui de la configuration 2 ($\bar{L}^h = 1$).

4.3.3.4 Résultats du cas critique de la configuration 1 et 2 où q est fixé

Les valeurs de délais moyens par appel pour une probabilité q fixée sont résumées dans le tableau 4.10. Le délai de la stratégie hiérarchique est, dans la majorité des cas, plus faible que celui de la stratégie à deux phases. Cependant, ce délai est plus élevé que celui de la stratégie à deux phases pour la configuration 1 et $q = 0.1$. En

Paramètres choisis	Comparaison des stratégies : délai moyen cas critique 1	Paramètres de performance : de handoff :	
		Trafic de voix et de données pour	
		$d/d_{RP} = 0.5$	$d/d_{RP} = 0.8$
$L^h = 3$, $\bar{L}^r = 7$ et $\bar{L}^p = 7$	stratégie à deux phases/ la stratégie hiérarchique	0.72	0.76
	stratégie de réacheminement partiel / la stratégie hiérarchique	1.80	1.94
$L^h = 1$, $\bar{L}^r = 7$ et $\bar{L}^p = 7$	stratégie à deux phases/ la stratégie hiérarchique	1.2	1.44
	stratégie de réacheminement partiel / la stratégie hiérarchique	3	3.66

Tab. 4.9 Délai de handoffs pour le cas critique : q variable

Comparaison : stratégie à deux phases/ stratégie hiérarchique		Paramètres de performance : délai moyen moyenne			
Paramètres	Probabilité q	Trafic de voix pour $d/d_{RP} =$		Trafic de données pour $d/d_{RP} =$	
		0.5	0.8	0.5	0.8
$L^h = 3$, $\bar{L}^r = 7$ et $\bar{L}^p = 7$	$q = 0.1$	0.44	0.46	0.44	0.46
	$q = 0.7$	1.73	1.49	3.76	4.27
$L^h = 1$, $\bar{L}^r = 7$ et $\bar{L}^p = 7$	$q = 0.1$	2.87	1.49	7.20	8.43
	$q = 0.7$	1.68	1.49	3.73	4.23

Tab. 4.10 Délai de handoffs pour le cas critique : q fixé

effet, d'une part le nombre de liens de réacheminement \bar{L}^h est supérieur à celui de la configuration 2 avec une probabilité q'_a élevée et, d'autre part, la stratégie à deux phases utilise moins fréquemment l'optimisation du chemin.

4.3.3.5 Analyse des résultats

Ainsi, le délai moyen par appel de la stratégie hiérarchique est, dans la majorité des cas, plus faible que celui des stratégies à deux phases et de réacheminement partiel. Toutefois, lorsque q est faible, ce délai est plus élevé que celui de la stratégie à deux phases. Une probabilité q faible correspond à des réseaux mobiles desservant des usagers à faible mobilité. Cependant, les réseaux mobiles futurs seront vraisemblablement caractérisés par une grande mobilité, due au nombre grandissant des usagers mobiles et à la taille des cellules radio de plus en plus petite. Ceci rend le handoff hiérarchique attractif puisqu'il permet de garantir non seulement un délai de handoff faible, mais aussi une largeur de bande moyenne par appel plus faible par rapport à ceux offerts par les handoffs à deux phases et de réacheminement partiel.

4.4 Probabilité de blocage d'appels

Dans cette section, on propose de calculer la probabilité de blocage d'appels des modèles à deux phases et de réacheminement partiel.

4.4.1 Stratégie à deux phases

4.4.1.1 Résultats obtenus

La figure 4.12 illustre la variation de la probabilité de blocage des nouveaux appels et des handoffs en fonction de C_h pour la stratégie à deux phases. Elle montre les valeurs obtenues avec le modèle de calcul de la probabilité de blocage que nous avons

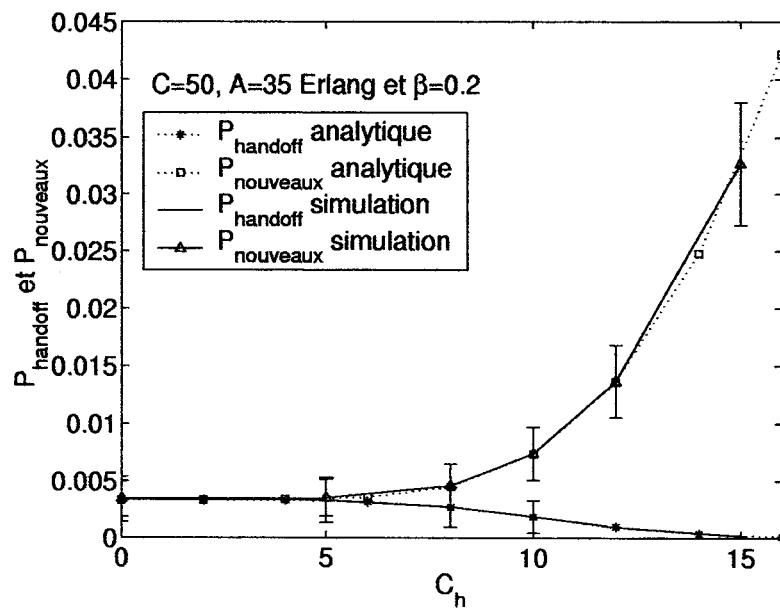


Fig. 4.12 Probabilité de blocage de nouveaux appels et des handoffs de la stratégie à deux phases : $C = 50$, $A = 35$ Erlang et $\beta = 0.2$

proposé ainsi que des valeurs obtenues par simulation du modèle. Nous constatons que les résultats obtenus avec notre modèle de calcul de la probabilité de blocage sont similaires à ceux générés par simulation. Le faible écart existant entre notre modèle et la simulation est dû à l'erreur engendrée par le simulateur. Nous constatons aussi qu'à $C_h = 0$, les probabilités de blocage des nouveaux appels et des demandes de handoffs sont identiques ; elles sont égales à $E_B(50, 35)$. La figure 4.13 illustre la variation de la probabilité de blocage des nouveaux appels et des handoffs de la stratégie à deux phases pour $C = 100$. Dans la figure 4.13, nous constatons que les courbes de la probabilité de blocage de la stratégie à deux phases gardent les mêmes allures que celles obtenues pour $C = 50$. Les valeurs de ces probabilités sont résumées dans le tableau 4.11.

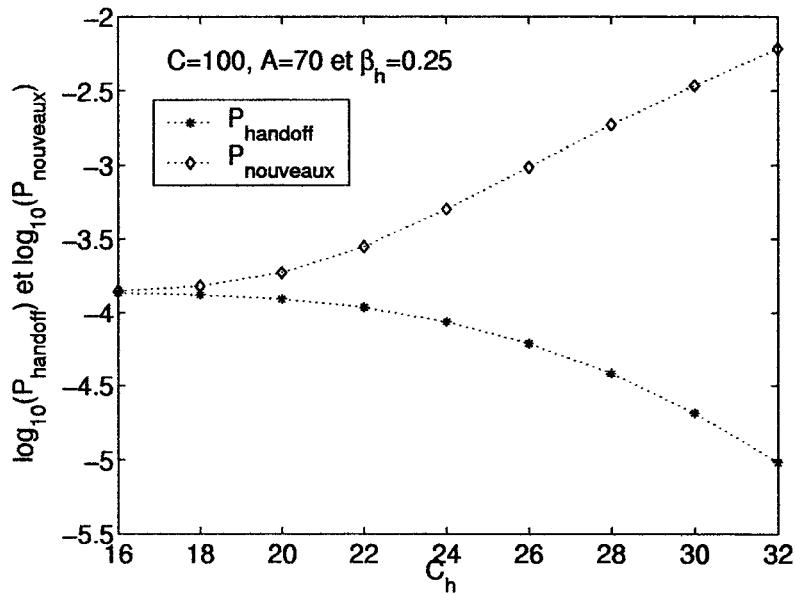


Fig. 4.13 Probabilité de blocage de nouveaux appels et des handoffs des stratégies à deux phases et hiérarchique : $C = 100$, $A = 70$ Erlang et $\beta = 0.25$

$C = 50, A = 35$ Erlang et $\beta = 0.2$		$C = 100, A = 70$ Erlang et $\beta = 0.25$	
C_h	P_{handoff}	C_h	P_{handoff}
0	0.003333	16	0.000136
2	0.003332	18	0.000132
4	0.003314	20	0.000124
6	0.003174	22	0.000108
8	0.002704	24	0.000086
10	0.001869	26	0.000061
12	0.000986	28	0.000038
14	0.000389	30	0.000020
16	0.000114	32	0.000009

Tab. 4.11 Probabilité de blocage d'appels de la stratégie à deux phases

4.4.1.2 Analyse des résultats

Les résultats obtenus montrent une variation stable de la probabilité de blocage d'appels en fonction de C_h et C . La probabilité de blocage de nouveaux appels est de l'ordre de 10^{-2} . Pour les appels de handoffs, elle est de l'ordre de 10^{-3} .

4.4.2 Stratégie hiérarchique

4.4.2.1 Stratégie hiérarchique pour le cas $C_{h1} + C_{h2} \leq C$

Les figures 4.14 et 4.15 illustrent la variation de la probabilité de blocage des nouveaux appels et des handoffs de la stratégie hiérarchique en fonction de C_{h1} pour $C = 50$ et $C = 100$ avec $C_{h1} + C_{h2} \leq C$. Les valeurs obtenues pour ces probabilités de blocage sont résumées dans le tableau 4.12. De grandes valeurs ont été considérées pour le paramètre C_{h2} ($C_{h2} = 34$ pour $C = 50$ et $C_{h2} = 68$ pour $C = 100$) car pour une valeur faible de C_{h2} , la probabilité de blocage des handoffs inter sous-réseaux est égale à celle des handoffs intra sous-réseaux.

4.4.2.2 Stratégie hiérarchique pour le cas $C_{h1} + C_{h2} \geq C$

Le tableau 4.13 résume les valeurs de la probabilité de blocage de nouveaux appels et demandes de handoffs de la stratégie hiérarchique quand $C_{h1} + C_{h2} \geq C$, et ceci pour différentes valeurs de β_{h1} et β_{h2} . À partir de ce tableau, nous constatons que la probabilité de blocage des handoffs inter sous-réseaux est inférieure à celle des

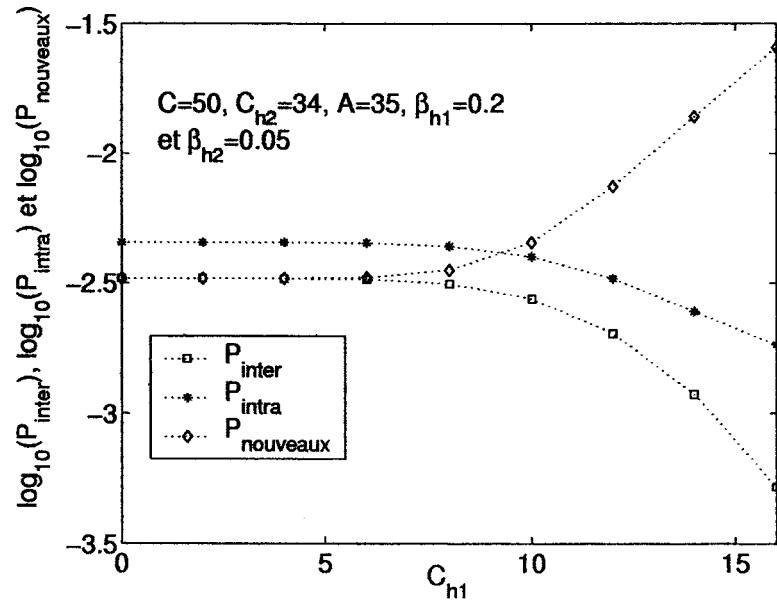


Fig. 4.14 Probabilité de blocage de nouveaux appels et des handoffs de la stratégie hiérarchique : $C = 50$, $A = 35$ Erlang, $\beta_{h1} = 0.2$, $\beta_{h2} = 0.05$ et $C_{h2} = 34$

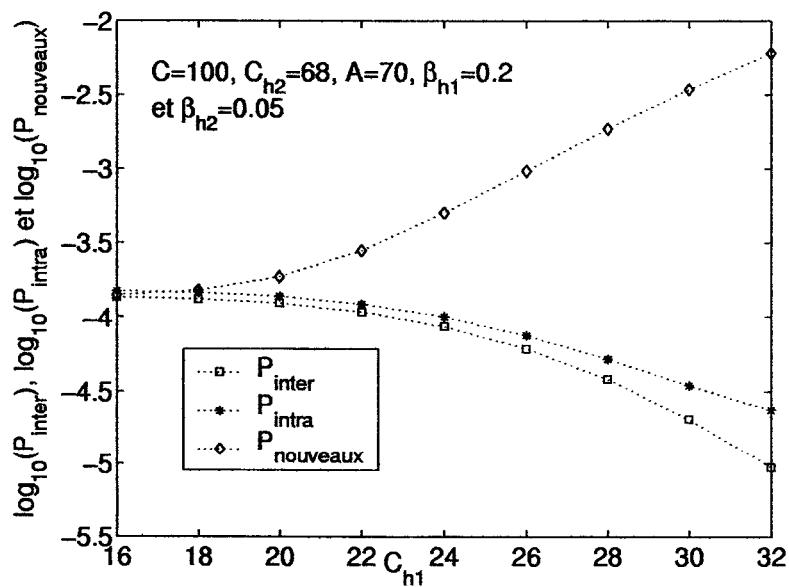


Fig. 4.15 Probabilité de blocage de nouveaux appels et des handoffs de la stratégie hiérarchique : $C = 100$, $A = 70$ Erlang, $\beta_{h1} = 0.2$, $\beta_{h2} = 0.05$ et $C_{h2} = 68$

$C = 50, A = 35 \text{ Erlang}, \beta_{h1} = 0.2,$ $\beta_{h2} = 0.05 \text{ et } C_{h2} = 34$				$C = 100, A = 70 \text{ Erlang}, \beta_{h1} = 0.2,$ $\beta_{h2} = 0.05 \text{ et } C_{h2} = 68$			
C_{h1}	P_{inter}	P_{intra}	$P_{nouveaux}$	C_{h1}	P_{inter}	P_{intra}	$P_{nouveaux}$
0	0.003287	0.004528	0.003287	16	0.000136	0.000150	0.000140
2	0.003287	0.004528	0.003287	18	0.000132	0.000146	0.000151
4	0.003286	0.004527	0.003289	20	0.000123	0.000137	0.000186
6	0.003264	0.004505	0.003319	22	0.000108	0.000122	0.000281
8	0.003137	0.004379	0.003543	24	0.000086	0.000100	0.000503
10	0.002747	0.003990	0.004525	26	0.000061	0.000075	0.000968
12	0.002030	0.003281	0.007425	28	0.000038	0.000052	0.001859
14	0.001189	0.002458	0.013869	30	0.000020	0.000034	0.003442
16	0.000523	0.001833	0.025591	32	0.000009	0.000023	0.006072

Tab. 4.12 Probabilité de blocage d'appels de la stratégie hiérarchique pour $C_{h1} + C_{h2} \leq C$

$C = 50, A = 35 \text{ Erlang}, \beta_{h1} = 0.05,$ $\beta_{h2} = 0.2 \text{ et } C_{h2} = 40$				$C = 50, A = 35 \text{ Erlang}, \beta_{h1} = 0.1,$ $\beta_{h2} = 0.15 \text{ et } C_{h2} = 80$			
C_{h1}	P_{inter}	P_{intra}	$P_{nouveaux}$	C_{h1}	P_{inter}	P_{intra}	$P_{nouveaux}$
10	0.002793	0.002804	0.004570	10	0.002764	0.004895	0.004543
12	0.002077	0.002088	0.007468	12	0.002047	0.004190	0.007444
14	0.001237	0.001248	0.013907	14	0.001207	0.003379	0.013888
16	0.000573	0.000585	0.025620	16	0.000546	0.002763	0.025609
18	0.000205	0.000218	0.044105	18	0.000186	0.002446	0.044100

Tab. 4.13 Probabilité de blocage d'appels de la stratégie hiérarchique pour $C_{h1} + C_{h2} \geq C$

handoffs intra sous-réseaux et ceci malgré le fait que $\beta_{h2} > \beta_{h1}$. Ainsi, il est possible d'avoir une faible probabilité de blocage d'appels pour :

- des handoffs inter sous-réseaux à faible taux d'arrivée, en utilisant le modèle hiérarchique avec $C_{h1} + C_{h2} \leq C$;
- des handoffs inter sous-réseaux à fort taux d'arrivée, en utilisant le modèle hiérarchique avec $C_{h1} + C_{h2} \geq C$.

En interchangeant la mise en réserve des canaux, de sorte que les handoffs intra sous-réseaux soient bloqués quand $i + j + k = C$ et que les handoffs inter sous-réseaux le soient quand $k = C - C_{h2}$, il est possible de configurer les handoffs intra sous-réseaux avec une faible probabilité de blocage en utilisant :

- le modèle hiérarchique avec $C_{h1} + C_{h2} \geq C$ pour des forts taux d'arrivée ;
- le modèle hiérarchique avec $C_{h1} + C_{h2} \leq C$ pour des faibles taux d'arrivée.

4.4.2.3 Analyse des résultats

La probabilité de blocage d'appels a été estimée pour différentes valeurs de mise en réserve de canaux, différents trafics offerts et pour différentes valeurs de C . Les résultats montrent que le modèle de calcul de la probabilité de blocage de nouveaux appels et des handoffs de la stratégie à deux phases est exact. Ils concordent avec ceux obtenus par simulation. La probabilité de blocage est de l'ordre de 10^{-2} pour les nouveaux appels et de 10^{-3} pour les appels de handoffs quand $C = 50$, $A = 35$ Erlang et $\beta = 0.2$. Ces probabilités diminuent quand le nombre de canaux C augmente lequel est supérieur au nombre requis pour le trafic offert A ($C = 100$, $A = 70$ et $\beta = 0.25$). La probabilité de blocage des nouveaux appels est de l'ordre de 10^{-3} et celle des appels de handoffs de 10^{-4} .

Le modèle de calcul de la probabilité de blocage d'appels à deux phases est appliqué à la stratégie hiérarchique. Deux cas de figures de mise en réserve ont été définis : $C_{h1} + C_{h2} \leq C$ et $C_{h1} + C_{h2} \geq C$. Le modèle hiérarchique permet de configurer l'un ou l'autre des deux types de handoffs avec une faible probabilité de blocage, et ceci pour différents taux d'arrivées de ces handoffs. Les résultats obtenus sont :

- une probabilité de blocage de nouveaux appels de l'ordre de 10^{-2} et une probabilité de blocage des handoffs intra et inter sous-réseaux de l'ordre de 10^{-3} pour $C = 50$, $A = 35$ Erlang $\beta_{h1} = 0.2$, $\beta_{h2} = 0.05$ et $C_{h2} = 34$;
- une probabilité de blocage de nouveaux appels de l'ordre de 10^{-3} et une probabilité de blocage des handoffs intra et inter sous-réseaux de l'ordre de 10^{-4} pour $C = 100$, $A = 70$ Erlang $\beta_{h1} = 0.2$, $\beta_{h2} = 0.05$ et $C_{h2} = 68$.

4.5 Recommandations

Notre étude nous a permis de constater que dans la majorité des cas, la stratégie hiérarchique permet une gestion efficace de la largeur de bande et une meilleure qualité de service, en terme de délai de handoff, que les stratégies à deux phases et de réacheminement partiel. Nous avons aussi constaté que le facteur influant sur ces mesures de performances est le degré de mobilité des usagers. Nous avons relevé que dans le cas critique et pour une mobilité faible, la stratégie à deux phases permet un délai de handoff plus faible que la stratégie hiérarchique. Par contre, pour un degré de mobilité élevé, la stratégie hiérarchique est plus performante en terme de délai de handoff que la stratégie à deux phases. Ceci nous a permis de proposer dans le tableau 4.14 des recommandations d'utilisation d'une stratégie de handoff en fonction du degré de mobilité des réseaux.

La stratégie hiérarchique est plus recommandée que les stratégies à deux phases et de réacheminement partiel pour les applications dans lesquelles une gestion efficace de la largeur de bande est plus importante que le délai encouru par les handoffs.

Performances pour les trafics voix et données	Stratégie recommandée :	
	pour des réseaux à grande mobilité	pour des réseaux à faible mobilité
largeur de bande faible	hiérarchique	hiérarchique
délai faible	hiérarchique	à deux phases

Tab. 4.14 Recommandations d'utilisation des stratégies de handoff

Pour les applications où la garantie d'un délai de handoff faible est plus importante qu'une utilisation efficace de la largeur de bande, deux cas peuvent se présenter :

- si la mobilité est élevée, le modèle hiérarchique reste la stratégie la plus recommandée parmi les trois stratégies de handoffs ;
- si la mobilité est faible, la stratégie à deux phases est plus recommandée que les stratégies hiérarchique et de réacheminement partiel.

Vu que la demande pour les services mobiles et multimédia augmente et que la taille des cellules radio est de plus en plus petite, il apparaît que les futurs réseaux ATM sans fil seront de grands réseaux à grande mobilité nécessitant une gestion efficace de la largeur de bande et une garantie de la qualité de service, en termes de délai de handoff et de probabilité de blocage. La stratégie hiérarchique est une solution qui répond à ces besoins en termes d'efficacité de gestion des ressources-réseau et de délai de handoff. De plus, grâce aux deux types de handoffs, il est possible de minimiser l'une ou l'autre des probabilités de blocage de handoffs intra ou inter sous-réseaux pour un modèle de trafic donné. Ce blocage asymétrique permet de contrôler le blocage de l'un ou l'autre des deux types de handoffs.

CHAPITRE 5

CONCLUSION

Nous concluons cette thèse par un rappel de nos principales contributions et par quelques suggestions de travaux subséquents.

5.1 Contributions du travail présenté dans cette thèse

Cette thèse propose une nouvelle stratégie de gestion des handoffs applicable aux réseaux sans fil orientés connexions permettant de garantir différentes qualités de service. Cette stratégie est appelée stratégie de handoff hiérarchique. Les performances de cette stratégie évaluées dans le cadre d'un modèle simple d'analyse répondent aux besoins de futurs réseaux sans fil, où le déplacement de l'usager assujettit la communication à plusieurs événements de handoffs et cela compte tenu de la taille de plus en plus réduite des cellules-radio. Les principales contributions de cette thèse sont :

1. Analyse des différentes stratégies de gestion du handoff dans les réseaux ATM sans fil : réacheminement complet, extension de la connexion, réacheminement partiel, arbre de connexions virtuelles et à deux phases ;
2. proposition d'une nouvelle stratégie de gestion du handoff : stratégie hiérarchique ;
3. définition de trois critères de performances applicables aux stratégies de handoff hiérarchique, à deux phases et de réacheminement partiel. Ces critères ont été

- utilisés pour estimer la largeur de bande par appel, du délai de handoff par appel et de la probabilité de blocage des appels ;
4. développement d'un modèle analytique de calcul de la largeur de bande et du délai de handoff pour les trois stratégies de handoff : à deux phases, de réacheminement partiel et hiérarchique ;
 5. développement d'un modèle analytique de calcul de la probabilité de blocage des nouveaux appels et des demandes de handoff pour les trois stratégies de handoff : à deux phases, de réacheminement partiel et hiérarchique ;
 6. étude comparative des procédures de handoff hiérarchique, à deux phases et de réacheminement partiel. Cette étude est basée sur une analyse numérique des deux critères de performance : la largeur de bande par appel et le délai de handoff par appel ;
 7. calcul des probabilités de blocage des nouveaux appels et des appels de handoffs pour les stratégies à deux phases, de réacheminement partiel et hiérarchique ;
 8. recommandations d'utilisation d'une stratégie particulière de handoff selon le type d'usagers mobiles supportés par les réseaux ATM sans fil.

La description générale de la stratégie de handoff hiérarchique a fait l'objet du chapitre 2. L'idée de base de cette stratégie a germé à partir de l'analyse des différentes stratégies de handoff existantes que nous avons classé en deux catégories : simples et hybrides. Parmi les stratégies de handoffs simples, celle qui utilise le réacheminement partiel est la plus performante. Cependant, le temps nécessaire à la détermination du commutateur de handoff et à l'échange de messages de signalisation durant un réacheminement partiel peut dépasser le délai maximal admissible pour les handoffs. Une amélioration de performances résulte de l'utilisation d'une procédure à deux phases qui combine le réacheminement partiel et l'extension du chemin afin de réduire le délai de réponse aux demandes de handoffs. Bien que la procédure à deux

phases permette de répondre assez rapidement aux demandes de handoffs, il demeure que l'exécution de deux procédures en cascade, une extension et un réacheminement partiel, d'une part, rend la stratégie complexe, et d'autre part résulte en des délais de traitement importants pour les réseaux de grande envergure.

Pour pallier ces problèmes de complexité et de délai, nous avons proposé une nouvelle stratégie de handoff appelée handoff hiérarchique. Cette dernière combine les avantages de deux stratégies de handoffs simples : le réacheminement partiel et l'arbre de connexions virtuelles. Dans la stratégie hiérarchique, les cellules radio du réseau ATM sans fil sont regroupées en sous-arbres inter-connectés par des commutateurs ATM où des ressources réseaux sont pré-allouées. Grâce à cette réservation de ressources, le déplacement des usagers à l'intérieur des sous-arbres conduit à des handoffs intra sous-réseaux qui n'engendrent aucun trafic de signalisation. Le déplacement de l'usager d'un sous-réseau à l'autre déclenche des handoffs inter sous-réseaux qui sont gérés en utilisant la méthode de réacheminement partiel. Pour fin de comparaison entre les différentes stratégies que nous avons considéré, nous avons introduit deux mesures de performances liées, d'une part à la largeur de bande moyenne d'utilisation, et d'autre part au délai de handoff. Une troisième mesure, liée à la qualité de service perçue par l'usager, s'intéresse à la probabilité de blocage des différents types d'appels. Avec des mesures de performances ainsi définies, nous proposons deux modèles simples d'évaluation.

- un modèle analytique de calcul de la largeur de bande et du délai de handoff par appel, applicable aux trois stratégies de handoff hiérarchique, à deux phases et de réacheminement partiel ;
- un modèle analytique de calcul de probabilité de blocage des différents types d'appels considérés dans le cadre des trois stratégies de handoff.

Le chapitre 3 a présenté un modèle analytique de calcul de la largeur de bande et du délai de handoffs applicable aux trois stratégies de handoff considérées. Ce modèle est basé sur une extension du modèle analytique à temps discret proposé dans [110]. Nous avons complété le modèle applicable au calcul de la largeur de bande par appel de [110] en incluant le calcul du délai moyen par appel des demandes de handoffs. Un modèle analytique de calcul de la probabilité de blocage des nouveaux appels et des demandes de handoff a aussi été considéré. Dans ce cadre, on a présenté une étude de l'affectation des canaux radio d'une cellule basée sur le modèle de mise en réserve de canaux pour les demandes de handoff intra et inter sous-réseaux. Ce modèle utilise un processus markovien de naissance et de mort multidimensionnel où l'état d'une cellule radio est représenté par le nombre d'appels de chaque type dans la cellule.

Les résultats numériques relatifs aux modèles développés dans le chapitre 3 font l'objet du chapitre 4. De façon générale, on peut dire qu'ils confirment nos attentes puisque :

- la largeur de bande moyenne par appel de la stratégie hiérarchique est plus faible que celle des procédures à deux phases et de réacheminement partiel sur une grande plage de variation de mobilité des usagers ;
- le délai moyen par appel de la stratégie hiérarchique est aussi plus faible que celui de la stratégie de réacheminement partiel pour différents degrés de mobilité ;
- le délai moyen par appel de la stratégie hiérarchique est plus faible que celui du handoff à deux phases dans le cas de mobilité importante des usagers ;
- le délai moyen par appel de la stratégie hiérarchique est, par contre, plus élevé que celui de la stratégie à deux phases quand la mobilité est restreinte. Ceci est dû au fait que, dans ce cas, la stratégie à deux phases utilise moins souvent le réacheminement de la connexion dont le délai de mise en oeuvre est plus élevé que celui de l'extension du chemin.

Les valeurs de la probabilité de blocage encourue par les stratégies hiérarchique et à deux phases ont été estimées en fonction du nombre de canaux radio mis en réserve pour répondre aux demandes de handoff et de trafic externe. Les résultats numériques partiels obtenus confirment que l'utilisation d'un blocage asymétrique des différents types de trafics permet de contrôler leur blocage effectif.

En guise de conclusion, il apparaît à ce stade de notre étude que la stratégie hiérarchique constitue la procédure de choix pour la gestion des handoffs dans les réseaux ATM/IP sans fil, comportant un nombre élevé d'usagers ainsi qu'une fréquence importante de handoffs dus à leur mobilité.

5.2 Suggestions de recherches futures sur le sujet

Les performances atteintes par la stratégie hiérarchique nous encouragent à explorer d'avantage cette stratégie en proposant les points suivants comme sujets de recherches futures :

5.2.1 Topologie hiérarchique

Construire une topologie de réseau hiérarchique et un modèle réaliste de calcul de la capacité et du nombre de liens des connexions mobiles. Cette topologie permettra de déterminer un modèle probabiliste d'évaluation du nombre moyen de liens par connexion et de la capacité de chaque lien nécessaire à l'évaluation précise de la largeur de bande moyenne et du délai moyen par appel.

5.2.2 Modèle dynamique de gestion des handoffs

Construire un modèle dynamique permettant de choisir dynamiquement la stratégie de handoff, parmi celles étudiées dans ce travail et en fonction des conditions quasi instantanées du réseau. Ce choix pourrait consister à appliquer la stratégie hiérarchique dans le cadre d'applications à grande mobilité alors que la stratégie à deux phases serait préférée pour des applications à faible mobilité.

5.2.3 Handoff multi-cellules

Estimer les valeurs de la probabilité de blocage des nouveaux appels et des appels de handoffs pour un réseau couplé de cellules radio. Il s'agit d'un réseau jacksonnien où l'état du système peut être représenté par un vecteur représentant le nombre de canaux radio de chaque type occupés dans chaque cellule.

5.2.4 Handoff multicast

Une application du handoff hiérarchique serait de supporter des groupes multicasts, où joindre et quitter ce groupe peut être considéré comme étant un handoff. Un usager appartenant à un sous-réseau qui veut joindre ou quitter un groupe multicast du même sous-réseau sera considéré comme étant un handoff intra sous-réseaux. Celui qui voudrait joindre ou quitter un groupement multicast se trouvant dans un sous-réseau différent de celui auquel il appartient est représenté par un handoff inter sous-réseaux.

5.2.5 Déclenchement du handoff

Des critères de déclenchement du handoff peuvent être considérés pour la stratégie hiérarchique. Ces critères définissent des valeurs de qualité du signal radio à partir desquelles la procédure de handoff est déclenchée, accordant suffisamment de temps pour l'exécution du handoff.

5.2.6 Étude des protocoles ATM PNNI pour la stratégie hiérarchique

Étude de l'intégration et de l'impact de la stratégie hiérarchique dans les réseaux PNNI. Dans ce cas, chaque arbre est considérés comme un réseau privé. La connexion entre les différents arbres utilise le protocole PNNI. Un exemple d'étude du handoff dans des réseaux ATM sans fil PNNI est donnée dans [63].

En conclusion, les problèmes futurs proposés sont une étude de la topologie hiérarchique, une analyse du modèle dynamique de gestion des handoffs, une étude du handoff multi-cellules, une étude du handoff multicast, une étude sur le critère de déclenchement du handoff et une étude de l'implémentation de la stratégie hiérarchique dans les réseaux PNNI.

RÉFÉRENCES

- [1] European Telecommunication Standards Institute (ETSI) project on Broadband Radio Access Network (BRAN). www.etsi.fr/bran/.
- [2] www.3gpp.org.
- [3] www.itu.org.
- [4] www.umts-forum.org.
- [5] ATM User-Network Interface (UNI) Specification version 3.0. ATM Forum Specification version 3.0, septembre 1993.
- [6] I.363 - B-ISDN ATM Adaptation Layer specification. ITU-T Recommandation I.363, mars 1993.
- [7] Integrated services in the internet architecture : an overview. – RFC1633, juin 1994.
- [8] Q.2931 - Digital Subscriber Signalling System No. 2 (DSS 2) : User-Network Interface (UNI) layer 3 specification for basic call/connection control. ITU-T Recommandation Q.2931, février 1995.
- [9] I.363.1 - B-ISDN ATM Adaptation Layer specification : type 1. ITU-T Recommandation I.363.1, août 1996.
- [10] I.363.3 - B-ISDN ATM Adaptation Layer specification : type 3/4. ITU-T Recommandation I.363.3, août 1996.
- [11] I.363.5 - B-ISDN ATM Adaptation Layer specification : type 5. ITU-T Recommandation I.363.5, août 1996.
- [12] General characterization parameters for integrated service network elements. – RFC2215, septembre 1997.

- [13] I.363.2 - B-ISDN ATM Adaptation Layer specification : type 2. ITU-T Recommandation I.363.2, septembre 1997.
- [14] Resource reservation protocol RSVP version 1 functional specification. – RFC2205, septembre 1997.
- [15] Specification of guaranteed quality of service. – RFC2212, septembre 1997.
- [16] An architecture for differentiated services. – RFC2475, décembre 1998.
- [17] Definition of the Differentiated Services Field (DS Field) in the IPv4 and IPv6 headers. – RFC2474, décembre 1998.
- [18] The ETSI UMTS Terrestrial Radio Access (UTRA). – ETSI SMG, Tdoc 032/98, janvier 1998.
- [19] Requirements for traffic engineering over MPLS. – RFC2702, MPLS working group, septembre 1999.
- [20] A core MPLS IP VPN architecture. – RFC2917, MPLS working group, septembre 2000.
- [21] Annual report and analysis of competitive market conditions with respect to commercial mobile services. – Sixth Report/FCC01-192, juillet 2001.
- [22] A Multiprotocol Label Switching architecture. – RFC3031, MPLS working group, janvier 2001.
- [23] ATM User-Network Interface (UNI) Specification version 4.1. ATM Forum Specification version 4.1, novembre 2002.
- [24] Multiprotocol Label Switching (MPLS) support of differentiated services. – RFC3270, MPLS working group, mai 2002.
- [25] Overview of IP multicast in a Multiprotocol Label Switching (MPLS) environment. – RFC3353, MPLS working group, août 2002.

- [26] Acampora (A.). – Wireless ATM : a perspective on issues and prospects. *IEEE Personal Communications*, vol. 3, n4, août 1996, pp. 8–17.
- [27] Acampora (A. S.) et Naghshineh (M.). – An architecture and methodology for mobile-executed handoff in cellular ATM networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 12, n8, octobre 1994, pp. 1365–1375.
- [28] Acharaya (A.) et al. – Signaling syntax extension for handoff control in mobile ATM. *ATM Forum Contribution 96-1625*, décembre 1996.
- [29] Acharya (A.), Li (J.), Rajagopalan (B.) et Raychaudhuri (D.). – Mobility management in wireless ATM networks. *IEEE Communications Magazine*, vol. 37, novembre 1997, pp. 100–109.
- [30] Acharya (A.), Li (J.) et Raychaudhuri (D.). – Primitives for location management and handoff in mobile ATM networks. *ATM Forum Contribution 96-1121*, 1996.
- [31] Acharya (A.) et Rajagopalan (B.). – Comparison of location management schemes for mobile ATM. *ATM Forum Contribution 97-0161*, février 1997.
- [32] Akyol (B. A.). – An architecture for a future wireless ATM network. – Thèse de Doctorat, Département de Génie Électrique, Université de Stanford, juin 1997.
- [33] Akyol (B. A.) et Cox (D. C.). – Signaling alternatives in a wireless ATM network. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 15, n 1, janvier 1997, pp. 35–49.
- [34] Awduche (D. O.) et Jabbari (B.). – Internet traffic engineering using Multi-protocol Label Switching MPLS. *Computer Networks*, www.elsevier.com/locate/comnet, 2002, pp. 112–129.

- [35] Ayanoglu (E.), Eng (K. Y.) et Karol (M. J.). – Wireless ATM : limits, challenges, and proposals. *IEEE Personal Communications*, vol. 3, n°4, août 1996, pp. 18–34.
- [36] Banh (B. A. J.), Anido (G. J.) et Dutkiewicz (E.). – Handover re-routing schemes for connection oriented services in mobile ATM networks. *Proceedings of IEEE INFOCOM'98*, San Francisco, CA, 1998, pp. 1139–1146.
- [37] Bauts (G.) et Johnson (M.). – Proposal for location management in wireless ATM. *ATM Forum Contribution 96-1516*, décembre 1996.
- [38] Bautz (G.), Mitts (H.), Mikkonen (J.), Niemi (M.) et Rauhala (K.). – A proposal for access point control protocole. *ATM Forum Contribution 97-0507*, juillet 1997.
- [39] Bhat (R.). – Proposal for a separate requirements document for WATM. *ATM Forum Contribution 98-0232*, 1998.
- [40] Bush (S. F.), Jagannath (S.), Evans (J. B.), Frost (V. S.), Sanchez (R.), Minden (G. J.) et Shanmugan (K. S.). – A control and management network for wireless ATM systems. *ACM/Baltzer Journal on Mobile Networks and Applications*, vol. 3, n°4, 1997, pp. 267–283.
- [41] Calin (D.). – Modèle de trafic pour les réseaux mobiles multimédia. – Thèse de Doctorat, Département d’Informatique et Réseaux, Université de Versailles, juillet 1998.
- [42] Chlamtac (I.), Faragó (A.), Henk (T.) et Gordos (G.). – Optimizing bandwidth allocation in cellular networks with multirate traffic. *IEEE GLOBECOM'96*, London, novembre 1996, pp. 18–22.
- [43] Chow (A.), Shieh (P.), Barton (M.) et Cui (A.). – WATM network inter-working processes, call features and mobility. *ATM Forum Contribution 97-0035*, 1997.

- [44] Cornaglia (B.), Santaniello (R.) et Scarrone (E.). – Proposal for the protocol reference model for wireless ATM. ATM Forum Contribution 96-1650, 1996.
- [45] Danzig (P.), Jamin (S.), Cáceres (R.), Mitzel (D.) et Estrin (D.). – An empirical workload model for driving wide-area TCP/IP network simulations. Interworking : Research and experience, vol. 3, n1, mars 1992, pp. 1–26.
- [46] Dasilva (J. S.), Ikonomou (D.) et Erben (H.). – European R & D programs on third-generation mobile communication systems. IEEE Personal Communications, vol. 4, n1, février 1997, pp. 46–52.
- [47] Dellaverson (L.). – Proposed chapter, work plan and schedule for a wireless ATM working group. ATM Forum Contribution 96-0712, 1996.
- [48] Duault (M.). – Location management for mobile networks. ATM Forum Contribution 97-0087, 1997.
- [49] Fang (Y.) et Chlamtac (I.). – Teletraffic analysis and mobility modeling of PCS networks. IEEE Transactions on Communications, vol. 47, n7, juillet 1999, pp. 1062–1072.
- [50] Fowler (H.) et Leland (W.). – Local area network traffic characteristics, with implications for broadband network congestion management. IEEE Journal on Selected Areas in communications, vol. 9, n7, septembre 1991, pp. 1139–1149.
- [51] Guerin (R.). – Channel occupancy time distribution in a cellular radio system. IEEE trans. veh. technol, vol. vol. VT-36, nno. 3, août 1987, pp. 89–99.
- [52] Guérin (R.). – Queuing-blocking system with two arrival streams and guard channels. IEEE Transactions on Communications, vol. 36, n2, février 1988, pp. 153–163.
- [53] Hong (D.) et Rappaport (S. S.). – Traffic model and performance analysis for cellular mobile radio telephone systems with prioritized and nonprioritized

- handoff procedures. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 35, n3, août 1986, pp. 77–92.
- [54] Jabbari (B.). – Teletraffic aspects of evolving and next-generation wireless communications networks. *IEEE Personal Communications*, décembre 1996, pp. 4–9.
- [55] Jain (R.) et Routhier (S.). – Packet trains — measurements and a new model for computer network traffic. *IEEE Journal on Selected Areas in communications*, vol. 4, n6, septembre 1986, pp. 986–995.
- [56] Jedrzycki (C.) et Leung (V. C.). – Probability distributions of channel holding time in cellular telephony systems. in Proceeding IEEE Vehicular Technology Conference, Atlanta, GA, 1996, pp. 247–251.
- [57] Kara (N.), Conan (J.) et Girard (A.). – Handoff management in wireless ATM networks. The Eleventh International Conference on Wireless Communications, Calgary, juillet 1999, pp. 48–54.
- [58] Kara (N.), Conan (J.) et Girard (A.). – Performance evaluation of the hierarchical handoff scheme for wireless ATM networks. 3rd IFIP/IEEEConference on the Management of Multimedia Networks and Services, Fortaleza-Ceara, Brazil, septembre 2000.
- [59] Kara (N.), Conan (J.) et Girard (A.). – Performance analysis of the hierarchical handoff scheme in wireless ATM networks. MS3G, Lyon, France, décembre 2001.
- [60] Katzela (I.) et Naghshineh (M.). – Channel assignment schemes for cellular mobile telecommunication systems : a comprehensive survey. *IEEE Personal Communications*, vol. 3, juin 1996, pp. 10–31.

- [61] Kim (D. K.) et Toh (C. K.). – Mobile multicasting in wireless ATM networks. ACM/Baltzer Journal on Mobile Networks and Applications, vol. 5, n^o 2, 2000, pp. 103–110.
- [62] Leland (W.), Taqqu (M.), Willinger (W.) et Wilson (D.). – On the self-similar nature of Ethernet traffic. IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 2, n^o 1, février 1994, pp. 1–15.
- [63] Li (J.), Yates (R.) et Raychaudhuri (D.). – Handoff control in the PNNI hierarchy of mobile ATM networks. Proceeding of the 32nd Hawaii International Conference on System Sciences, janvier 1999.
- [64] Lin (Y. B.), Mohan (S.) et Noerpel (A.). – Queuing priority channel assignment strategies for PCS handoff and initial access. IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 43, n^o 3, août 1994, pp. 704–712.
- [65] Lind (C.), Umehira (M.) et Matsumoto (Y.). – A reference architecture for WATM. ATM Forum Contribution 96-1695, 1996.
- [66] Liu (F.) et Barton (M.). – Example of a wide area wireless ATM evolution strategy. ATM Forum Contribution 97-0259, 1997.
- [67] Markoulidakis (J. G), Lyberopoulos (G. .L) et Anagnostou (M. E.). – Traffic model for third generation cellular mobile telecommunication systems. Wireless Networks, vol. 4, n^o 5, 1998, pp. 389–400.
- [68] Marsan (M. A.), Chiasserini (C.), Cigno (R. L.), Munafò (M.) et Fumagalli (A.). – Local and global handovers for mobility management in wireless ATM networks. IEEE Personal Communications, vol. 4, octobre 1997, pp. 16–24.
- [69] Marsan (M. A.), Marano (S.), Mastroianni (C.) et Meo (M.). – Performance analysis of cellular mobile communication networks supporting multimedia services. ACM/Baltzer Journal on Mobile Networks and Applications, vol. 5, n^o 5, 2000, pp. 167–177.

- [70] McNair (J.), Akyildiz (I.-F.), Radhakrishnan (S.) et Racherla (G.). – Handoff rerouting scheme for multimedia connections in ATM-based mobile networks. Proceeding of the IEEE Vehicular Technology Conference (VCT'2000), septembre 2000.
- [71] McNair (J. Y.). – Mobility management protocols for wireless ATM networks. Proceedings of the IEEE, vol. 87, n^o8, août 1999, pp. 1365–1376.
- [72] Oh (S.) et Tcha (D.). – Prioritized channel assignment in a cellular radio network. IEEE Transactions on Communications, vol. 40, n^o7, juillet 1992, pp. 1259–1269.
- [73] Oliver (M.) et Borràs (J.). – Performance evaluation of variable reservation policies for handoff prioritization in mobile networks. IEEE INFOCOM'99, vol. 9, 1999, pp. 1187–1194.
- [74] Orlik (P.) et Rappaport (S. S.). – A model for teletraffic performance and channel holding time characterization in wireless cellular communication with general session and dwell time distributions. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 16, n^o5, 1998, pp. 788–803.
- [75] Park (S.), Bharghavan (V.) et Kang (S.). – Data link level support for handoff in wireless ATM networks. IEEE International Conference on Communications, Montréal, vol. 2, juin 1997, pp. 765–769.
- [76] Paxson (V.) et Floyd (S.). – Wide-area traffic : the failure of Poisson modeling. IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 3, n^o3, juillet 1995, pp. 226–244.
- [77] Posner (E. C.) et Guérin (R.). – Traffic policies in cellular radio that minimize blocking of handoff calls. The 11th ITC, Kyoto, Japan, septembre 1985, pp. 294–298.

- [78] Rajagopalan (B.). – Mobility management in integrated wireless-ATM networks. *Mobility Networks and Applications*, vol. 1, n 3, décembre 1996, pp. 273–285.
- [79] Rajagopalan (B.), Bautz (G.), Mitts (H.), Lundgren (S.), Massarella (A.), Arunachalam (A.), Banks (B.) et Herrmann (C.). – Reference configurations, requirements and an architecture model for location management in WATM networks. *ATM Forum Contribution 97-1041*, 1997.
- [80] Ramanathan (S.) et Steenstrup (M.). – A survey of routing techniques for mobile communications networks. *ACM/Baltzer Journal on Mobile Networks and Applications*, vol. 1, n 2, 1996, pp. 89–104.
- [81] Ramjee (R.), Porta (T. F. La), Kurose (J.) et Towsley (D.). – Performance evaluation of connection rerouting schemes for ATM-based wireless networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 6, n 3, juin 1998, pp. 249–261.
- [82] Rappaport (S. S.) et Purzynski (C.). – Prioritized resource assignment for mobile cellular communication systems with mixed services and platform types. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 45, n 3, août 1996, pp. 443–458.
- [83] Rappaport (T. S.). – The multiple-call hand-off problem in high-capacity cellular communications systems. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 40, n 3, août 1991, pp. 546–557.
- [84] Rauhala (K.). – Requirements for Mobile ATM Handover. *ATM Forum Contribution 96-989*, 1996.
- [85] Raychaudhuri (D.). – Wireless ATM networks : Architecture, system design and prototyping. *IEEE Personal Communications*, vol. 3, n 4, août 1996, pp. 42–49.

- [86] Raychaudhuri (D.), Dighe (R.), French (L.) et Suzuki (H.). – Technical scope outline for mobile ATM specification items. ATM Forum Contribution 96-0216, 1996.
- [87] Raychaudhuri (D.), French (L. J.), Siracusa (R. J.), Biswas (S.K.), Yuan (R.), Narasimhan (P.) et Johnston (C.). – WATMnet : a prototype wireless ATM system for multimedia personal communication. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 15, n1, 1997, pp. 83–92.
- [88] Raychaudhuri (D.) et Wilson (N. D.). – ATM-based transport architecture for multiservices wireless personal communication networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 12, n8, octobre 1994, pp. 1401–1414.
- [89] Richardson (K. W.). – UMTS overview. Electronics and Communication Engineering Journal, juin 2000, pp. 93–101.
- [90] Ruhela (V.). – Effective use of wireless technology to enhance productivity in information technology activity management. – Thèse de Maîtrise, Institut de Technologie de Massachusetts, avril 1999.
- [91] Starobinski (D.). – New call blocking versus handoff blocking in cellular networks. – Thèse de Maîtrise, Département de Génie Électrique, Institut de Technologie, Israel, décembre 1995.
- [92] Su (S.), Chen (J.) et Huang (J.). – Performance analysis of soft handoff in CDMA cellular networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 14, n9, décembre 1996, pp. 1762–1769.
- [93] Tekinay (S.) et Jabbari (B.). – Handover and channel assignment in mobile cellular networks. IEEE Communications Magazine, vol. 29, n 11, novembre 1991, pp. 42–46.

- [94] Tekinay (S.) et Jabbari (B.). – A measurement-based prioritization scheme for handovers in mobile cellular networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 10, n^o8, octobre 1992, pp. 1343–1350.
- [95] Toh (C. K.). – The design and implementation of a hybrid handover protocol for multi-media wireless LANs. *ACM First International Conference on Mobile Computing and Networking MOBICOM'95*, novembre 1995, pp. 49–61.
- [96] Toh (C. K.). – Crossover switch discovery for wireless ATM LANs. *ACM Journal on Mobile Networks and Applications*, ACM/Baltzer Press, vol. 1, n^o2, octobre 1996, pp. 141–165.
- [97] Toh (C. K.). – A handover paradigm for wireless ATM LANs. *Proceedings of ACM Symposium on Applied Computing : Special Track on Mobile Computing Systems and Applications*, Philadelphia, USA, février 1996, pp. 327–336.
- [98] Toh (C. K.). – A hybrid handover protocol for local area wireless ATM networks. *ACM/Baltzer Journal on Mobile Networks and Applications*, vol. 1, n^o3, décembre 1996, pp. 313–334.
- [99] Toh (C. K.). – Performance evaluation of crossover switch discovery algorithms for wireless ATM LANs. *Proceedings of IEEE INFOCOM'96*, San Francisco, CA, 1996, pp. 1380–1387.
- [100] Toh (C. K.). – A unifying methodology for handovers of heterogeneous connections in wireless ATM networks. *ACMSIGCOMM Computer and Communications Review*, vol. 27, n^o1, janvier 1997.
- [101] Toh (C. K.) et Akyol (B. A.). – A survey of handover techniques for wireless ATM networks. *International Journal of Wireless Information Networks*, vol. 5, n^o1, 1998, pp. 43–59.
- [102] Toh (C. K.) et Dao (S. K.). – Handover protocol design issues for wireless ATM. *ATM Forum Contribution 97-0668*, 1997.

- [103] Umehira (M.) et Matsumoto (Y.). – Proposed baseline text for the functional architecture model for wireless ATM systems. ATM Forum Contribution 97-0596, 1997.
- [104] Umehira (M.), Nakura (M.), Sato (H.) et Hashimoto (A.). – ATM wireless access for mobile multimedia : concept and architecture. IEEE Personal Communications, vol. 3, n5, octobre 1996, pp. 39–48.
- [105] Veeraraghavan (M.), Karol (M.) et Eng (K. Y.). – A combined handoff scheme for mobile ATM networks. ATM Forum Contribution 96-1700, 1996.
- [106] Veeraraghavan (M.), Karol (M. J.) et Eng (K. Y.). – Mobility and connection management in a wireless ATM LAN. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 15, n1, janvier 1997, pp. 50–68.
- [107] Viterbi (A. M.), Gilhousen (K. S.) et Zehavi (E.). – Soft handoff extends CDMA cell coverage and increases reverse link capacity. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 12, n8, octobre 1994, pp. 1281–1288.
- [108] Vondeak (T.) et Taylor (C.). – Wireless ATM service descriptions. ATM Forum Contribution 97-0945, 1997.
- [109] Wireless ATM Working Group. – Baseline text for ATM Forum wireless ATM specification. ATM Forum BTD-WATM-01, décembre 1997.
- [110] Wong (W. S. V.), Chan (H. C. B.) et Leung (V. C. M.). – Performance evaluations of path optimization schemes for inter-switch handoffs in Wireless ATM networks. Proceedings of ACM/IEEE MobiCom'98, Dallas, Texas, 1998, pp. 242–251.
- [111] Wong (W. S. V.) et Leung (V. C. M.). – A path optimization signaling protocol for inter-switch handoff in wireless ATM networks. Proceedings of 1st International Workshop on Wireless Mobile ATM Implementation (WMATM'98), Hangzhou, China, avril 1998, pp. 92–98.

- [112] Wong (W. V.). – Stochastic control of inter-switch handoff and location update in wireless cellular networks. – Thèse de Doctorat, Département de Génie Électrique, Université de British Columbia, avril 2000.
- [113] Xie (H.) et Kuek (S.). – Priority handoff analysis. Proceeding of the IEEE Vehicular Technology Conference, 1993.
- [114] Yoon (C. H.) et Kwan (C.). – Performance of personnal portable radio telephone systems with and without guard channels. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 11, n6, août 1993, pp. 911–917.
- [115] Yu (O. T. W.) et Leung (V. C. M.). – Connection architecture and protocols to support efficient handoffs over an ATM/B-ISDN personal communications networks. ACM/Baltzer Journal on Mobile Networks and Applications, vol. 1, n2, 1996, pp. 123–39.
- [116] Yu (O. W) et Leung (V.-C.). – Adaptive resource allocation for prioritized call admission over an ATM-based wireless PCN. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 15, n7, septembre 1997, pp. 1208–1225.
- [117] Yuan (R.), Biswas (S. K.) et Raychaudhuri (D.). – A signaling and control architecture for mobility support in wireless ATM networks. ACM/Baltzer Journal on Mobile Networks and Applications, vol. 1, n3, 1996, pp. 287–298.
- [118] Yum (T. S.) et Yeung (K. L.). – Blocking and handoff performance analysis of directed retry in cellular mobile systems. IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 44, n3, 1995, pp. 645–650.
- [119] Zeng (Q. A.), Mukumoto (K.) et Fukuda (A.). – Performance analysis of mobile cellular radio system with priority reservation handoff procedures. Proceeding of the IEEE Vehicular Technology Conference, Stockholm, mars 1994.

[120] Zeng (Q. A), Mukumoto (K.) et Fukuda (A.). – Performance analysis of two-level priority reservation handoff scheme in mobile cellular radio systems. Mobile Communication, vol. E80-B, n4, 1997, pp. 617–624.

ANNEXE I

ÉVALUATION DE LA LARGEUR DE BANDE MOYENNE PAR APPEL

Dans ce qui suit, nous proposons d'expliciter le calcul de la largeur de bande moyenne par appel. Nous savons qu'une connexion dans un réseau fixe utilise une largeur de bande b sur chaque lien reliant deux commutateurs ATM. Sa largeur de bande est fixe et est égale au nombre de liens composant cette connexion que multiplie b : c'est ce qu'on appelle la largeur de bande utile. Dans un réseau mobile, la largeur de bande d'une connexion est variable du fait de la variation de la longueur des connexions. Elle est égale au nombre de liens d'une connexion que multiplie b (largeur de bande utile) augmentée de la largeur de bande de signalisation du handoff.

Pour le calcul de cette largeur de bande, on considère un appel dont la durée est subdivisée en intervalles assez petits de sorte qu'un seul handoff peut débuter et que l'intervalle est assez long pour considérer qu'il va aussi se terminer dans ce même intervalle. On calcule alors la largeur de bande à l'intérieur de chaque intervalle, dont on fait la somme sur la durée totale de vie de l'appel. On évalue finalement la moyenne sur toutes les durées d'appel.

Soit le diagramme temporel représenté sur la figure I.1.

Nous définissons :

- n le nombre d'intervalles pour un appel donné.
- b_i^l la largeur de bande utilisée par un appel durant l'intervalle de temps $[i, i + 1]$;

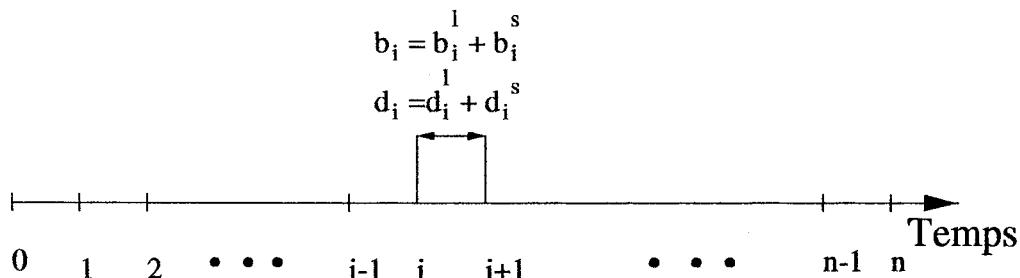


Fig. I.1 Diagramme temporel

- b_i^s la largeur de bande de signalisation lorsqu'un handoff se produit dans cet intervalle ;
- b_i la largeur de bande utilisée par un appel durant l'intervalle de temps $[i, i + 1]$.

À chaque intervalle $[i, i + 1]$, nous définissons :

- L_i le nombre de liaisons entre le commutateur auquel est rattaché le terminal mobile et le point-extrémité ;
- H_i le nombre de liaisons entre la station de base originale et la station de base cible durant l'extension du chemin.

b_i^l et b_i^s sont des variables aléatoires dont la valeur dépend de la présence ou non d'un handoff durant l'intervalle $[i, i + 1]$, ainsi que du réacheminement possible de la connexion une fois que le handoff s'est produit. Il s'ensuit que la variable b_i^l peut prendre deux valeurs dépendantes de la présence ou non d'un handoff dans l'intervalle $[i, i + 1]$. Lorsque l'appel subit un handoff dans l'intervalle $[i, i + 1]$, b_i^l représente la somme de la largeur de bande allouée le long du chemin original et celle allouée sur la nouvelle portion de chemin résultant d'un réacheminement. Dans le cas contraire, elle représente simplement la largeur de bande utilisée sur le chemin. On peut alors écrire

$$b_i = \begin{cases} b_i^l + b_i^s & \text{si on a un handoff dans } [i, i + 1] \\ b_i^l & \text{sinon.} \end{cases} \quad (\text{I.1})$$

I.1 Le handoff à deux phases

Dans ce cas, on doit prendre en considération les évènements suivants : les handoffs inter-commutateurs, avec extension du chemin, qui se produisent avec une probabilité q_a , et l'optimisation du chemin exécutée avec une probabilité q après chaque extension du chemin.

Pour chaque intervalle de temps i , on définit deux variables aléatoires correspondant à la présence ou non d'un handoff et d'une réoptimisation.

$$K_i = \begin{cases} 1 & \text{un handoff se produit} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{I.2})$$

$$J_i = \begin{cases} 1 & \text{si on réoptimise le chemin} \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (\text{I.3})$$

Nous supposons de plus que $E[K_i] = q_a$ et $E[J_i] = q$.

I.1.1 Largeur de bande utile

La largeur de bande utilisée dans l'intervalle de temps $[i, i + 1]$ est donnée par :

$$\begin{aligned} b_i^l &= b_{i-1}^l [(1 - K_i) + K_i (1 - J_i)] + b K_i [J_i L_i(i) + (1 - J_i) H_i(i)] \\ &= b_{i-1}^l [1 - K_i J_i] + b K_i [J_i L_i(i) + (1 - J_i) H_i(i)]. \end{aligned} \quad (\text{I.4})$$

On voit que b_i^l dépend de deux termes. Le premier s'exprime en fonction de b_{i-1}^l et donc de toutes les variables aléatoires K_j et J_j , $j = 1, \dots, i - 1$, alors que le second ne dépend que des variables K_i et J_i de l'intervalle courant. Définissons les nouvelles

variables aléatoires $s_j = (K_j, J_j)$ où s_j représente le couple de variables K et J à la période j , ainsi que le vecteur $\mathbf{s}^j = [s_1, s_2 \dots s_j]$.

En général les longueurs de chemins L_i et H_i vont dépendre de façon complexe des événements qui se sont produits avant i . Ce sont en général des variables aléatoires qu'il faut alors désigner par $L_i(\mathbf{s}^i)$ et $H_i(\mathbf{s}^i)$. Compte tenu de ces remarques on peut réécrire l'équation I.4 plus explicitement comme :

$$b_i^l(\mathbf{s}^i) = b_{i-1}^l(\mathbf{s}^{i-1}) [1 - K_i J_i] + b K_i [J_i L_i(\mathbf{s}^i) + (1 - J_i) H_i(\mathbf{s}^i)]. \quad (\text{I.5})$$

Étant donné l'indépendance des événements dans chaque intervalle, on peut écrire pour le vecteur \mathbf{s}^i

$$p(\mathbf{s}^i) = p(\mathbf{s}^{i-1})p(K_i, J_i)$$

où $p(K_i, J_i)$ est la probabilité d'avoir une configuration donnée des variables aléatoires K_i et J_i . On notera que $p(0, 1) = 0$ puisqu'on ne peut avoir un rerouting qu'après un handoff. Définissons aussi les deux quantités auxiliaires

$$g(K_i, J_i) = [1 - K_i J_i] \quad (\text{I.6})$$

$$h(\mathbf{s}^i) = b K_i [J_i L_i(\mathbf{s}^i) + (1 - J_i) H_i(\mathbf{s}^i)]. \quad (\text{I.7})$$

L'espérance sur les événements de handoff s'écrit alors

$$\begin{aligned} E[b_i^l] &= \sum_{\mathbf{s}^i} p(\mathbf{s}^i) [b_{i-1}^l(\mathbf{s}^{i-1})g(K_i, J_i) + h(\mathbf{s}^i)] \\ &= \sum_{\mathbf{s}^i} p(\mathbf{s}^{i-1})p(K_i, J_i) [b_{i-1}^l(\mathbf{s}^{i-1})g(K_i, J_i) + h(\mathbf{s}^i)] \end{aligned}$$

$$= \sum_{\mathbf{s}^{i-1}} p(\mathbf{s}^{i-1}) \sum_{K_i, J_i} p(K_i, J_i) [b_{i-1}(\mathbf{s}^{i-1})g(K_i, J_i) + h(\mathbf{s}^i)]. \quad (\text{I.8})$$

Étant donné que L_i et H_i dépendent de façon complexe de \mathbf{s}^i , on doit faire des simplifications pour pouvoir continuer. En fait, nous supposons qu'ils sont constants du fait qu'en général on peut s'attendre à ce que les chemins occupés par une connexion et les extensions ne varient pas beaucoup d'un handoff à l'autre. Sous cette hypothèse, nous pouvons poursuivre les calculs de sorte que I.8 devient :

$$\begin{aligned} E[b_i^l] &= \sum_{\mathbf{s}^{i-1}} p(\mathbf{s}^{i-1}) b_{i-1}(\mathbf{s}^{i-1}) \sum_{K_i, J_i} p(K_i, J_i) g(K_i, J_i) + \\ &\quad \sum_{\mathbf{s}^{i-1}} p(\mathbf{s}^{i-1}) \sum_{K_i, J_i} p(K_i, J_i) h(K_i, J_i) \\ &= E[b_{i-1}^l] \sum_{K_i, J_i} p(K_i, J_i) g(K_i, J_i) + \\ &\quad \sum_{K_i, J_i} p(K_i, J_i) h(K_i, J_i) \end{aligned} \quad (\text{I.9})$$

avec $\sum_{\mathbf{s}^{i-1}} p(\mathbf{s}^{i-1}) = 1$. On peut calculer les deux termes

$$\begin{aligned} \sum_{K_i, J_i} p(K_i, J_i) g(K_i, J_i) &= (1 - q_a)g(0, 0) + \\ &\quad q_a [pg(1, 1) + (1 - p)g(1, 0)] \\ g(0, 0) &= 1 \\ g(1, 1) &= 0 \\ g(1, 0) &= 1 \\ \sum_{K_i, J_i} p(K_i, J_i) h(K_i, J_i) &= (1 - q_a)h(0, 0) + \\ &\quad q_a [ph(1, 1) + (1 - p)h(1, 0)] \\ h(1, 1) &= L \end{aligned} \quad (\text{I.10})$$

$$\begin{aligned} h(1, 0) &= \bar{H} \\ h(0, 0) &= 0. \end{aligned} \tag{I.11}$$

En remplaçant chacun de ces termes dans l'équation I.9, on trouve

$$E[b_i^l] = (1 - q_a p) E[b_{i-1}^l] + q_a [(1 - p) \bar{H} + p \bar{L}] b. \tag{I.12}$$

En supposant que $E[b_0^l] = \bar{L}b$, on peut résoudre la récurrence (I.12) et on trouve

$$\begin{aligned} E[b_i^l] &= (1 - q_a p)^i \bar{L}b + [1 + (1 - q_a p) + \dots + (1 - q_a p)^{i-1}] M \\ &= (1 - q_a p)^i \bar{L}b + \frac{1 - (1 - q_a p)^i}{q_a p} M \end{aligned} \tag{I.13}$$

où $M = [q_a (1 - p) \bar{H} + q_a p \bar{L}] b$.

I.1.2 Largeur de bande de signalisation

La largeur de bande de signalisation due à la mobilité à l'instant i est donnée par

$$b_i^s = K_i (b_{EC} + J_i b_{RP}) \quad i \geq 1 \tag{I.14}$$

dont la moyenne de b_i^s sur les événements de handoff est

$$E[b_i^s] = q_a (b_{EC} + p b_{RP}) \quad i \geq 1. \tag{I.15}$$

I.1.3 Largeur de bande totale

La largeur de bande totale $b(n)$ utilisée durant les n périodes d'un appel est donnée par

$$b^p(n) = b^l(n) + b^s(n) \quad (\text{I.16})$$

$$b^s(n) = \sum_{i=0}^{n-1} E[b_i^s] \quad (\text{I.17})$$

$$b^l(n) = \sum_{i=0}^{n-1} E[b_i^l]. \quad (\text{I.18})$$

En utilisant l'équation (I.15), on trouve

$$\begin{aligned} b^s(n) &= \sum_{i=0}^{n-1} q_a(b_{EC} + pb_{RP}) \\ &= q_a(b_{EC} + pb_{RP})n. \end{aligned} \quad (\text{I.19})$$

De la même façon, utilisant l'équation (I.13), et en définissant $\gamma = (1 - q_a p)$, on obtient

$$\begin{aligned} b^l(n) &= \sum_{i=0}^{n-1} \frac{M}{q_a p} + \left[\bar{L}b - \frac{M}{q_a p} \right] \sum_{i=0}^{n-1} \gamma^i \\ &= \frac{Mn}{q_a p} + \left[\bar{L}b - \frac{M}{q_a p} \right] \left(\frac{1 - \gamma^n}{q_a p} \right). \end{aligned} \quad (\text{I.20})$$

Nous avons calculé la largeur de bande moyenne utilisée par un appel de longueur n . Il faut maintenant évaluer la largeur de bande moyenne \bar{b} utilisée par tous les appels. Compte tenu que la probabilité qu'un appel dure n périodes est $P(n)$ avec

$$P(n) = (1 - q_f)^{n-1} q_f, \quad n \geq 1$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} nP(n) = \bar{n} = \frac{1}{q_f}$$

où la durée moyenne d'un appel s'obtient en multipliant \bar{n} par la durée de la période.

Nous avons alors

$$\overline{b^p} = \overline{b^s} + \overline{b} \quad (\text{I.21})$$

$$\begin{aligned} \overline{b^s} &= \sum_{n=1}^{\infty} b^s(n)P(n) \\ &= q_a(b_{EC} + pb_{RP}) \sum_{n=1}^{\infty} nP(n) \\ &= q_a(b_{EC} + pb_{RP}) \frac{1}{q_f}. \end{aligned} \quad (\text{I.22})$$

Nous allons de même calculer la largeur de bande moyenne utile pour tous les appels en utilisant l'équation (I.20)

$$\begin{aligned} \overline{b^l} &= \sum_{n=1}^{\infty} b^l(n)P(n) \\ &= \frac{M}{q_a p} \sum_{n=1}^{\infty} nP(n) + \left[\overline{Lb} - \frac{M}{q_a p} \right] \frac{1}{q_a p} \sum_{n=1}^{\infty} (1 - \gamma^n) P(n). \end{aligned} \quad (\text{I.23})$$

Nous devons évaluer l'expression suivante

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} \gamma^n P(n) &= q_f \sum_{n=1}^{\infty} \gamma^n (1 - q_f)^{n-1} \\ &= \frac{q_f}{1 - q_f} \sum_{n=1}^{\infty} \gamma^n (1 - q_f)^n \\ &= \frac{q_f}{1 - q_f} \sum_{n=1}^{\infty} [\gamma(1 - q_f)]^n \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{q_f}{1-q_f} \left[\frac{\gamma(1-q_f)}{1-\gamma(1-q_f)} \right] \\
&= q_f \left[\frac{\gamma}{1-\gamma(1-q_f)} \right]. \tag{I.24}
\end{aligned}$$

En remplaçant dans l'équation (I.23), on obtient

$$\begin{aligned}
\bar{b}^l &= \frac{M}{q_a p q_f} + \left(\bar{L}b - \frac{M}{q_a p} \right) \frac{1}{q_a p} \left[1 - \frac{q_f \gamma}{1-\gamma(1-q_f)} \right] \\
&= \frac{M}{q_a p q_f} + \left(\bar{L}b - \frac{M}{q_a p} \right) \frac{1}{q_a p} \left[\frac{q_a p}{1-\gamma(1-q_f)} \right] \\
&= \frac{M}{q_a p q_f} + \left(\bar{L}b - \frac{M}{q_a p} \right) \left[\frac{1}{1-(1-q_a p)(1-q_f)} \right]. \tag{I.25}
\end{aligned}$$

En remplaçant M par sa valeur et réarrangeant les termes, on trouve finalement

$$\bar{b}^l = \frac{\bar{L}}{q_f} b + b(1-p) \bar{H} \frac{1}{q_f} \left[\frac{q_a(1-q_f)}{(1-(1-q_a p)(1-q_f))} \right]. \tag{I.26}$$

En substituant les équations I.22 et I.25 dans I.22, nous aurons

$$\begin{aligned}
\bar{b}^p &= \frac{\bar{L}}{q_f} b + \frac{q_a(1-p)(1-q_f)\bar{H}}{q_f(1-(1-q_a p)(1-q_f))} b \\
&\quad + \frac{q_a}{q_f} (b_{EC} + pb_{RP}). \tag{I.27}
\end{aligned}$$

I.2 Le handoff de réacheminement partiel

Comme dans la section I.1, on note qu'un handoff inter-commutateurs est exécuté avec une probabilité q_a . Pour chaque intervalle de temps i , on définit la variable

aléatoire

$$I_i = \begin{cases} 1 & \text{si un handoff se produit} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{I.28})$$

correspondant à l'apparition d'un handoff suivi d'un réacheminement partiel de la connexion. On note $E[I_i] = q_a$.

I.2.1 Largeur de bande de signalisation

La largeur de bande de signalisation due à la mobilité à l'instant i est donnée par

$$b_i^s = I_i b_{RP} \quad i \geq 1. \quad (\text{I.29})$$

La moyenne correspondante sur les événements de handoff s'écrit donc

$$E[b_i^s] = q_a b_{RP} \quad i \geq 1. \quad (\text{I.30})$$

I.2.2 Largeur de bande utile

La largeur de bande utilisée dans l'intervalle de temps $[i, i + 1]$ est donnée par :

$$b_i^l = (1 - I_i) b_{i-1}^l + L_i(i) I_i b \quad i \geq 1. \quad (\text{I.31})$$

On remarque que b_i^l dépend de toutes les variables aléatoires I_j , $j = 1, \dots, i - 1$ et de la variable I_i de l'intervalle courant. La longueur $L_i(i)$ dépend d'une manière complexe des événements qui se sont produits avant i . Elle est représentée par $L_i(\mathbf{s}^i)$

avec $\mathbf{s}^i = [I_1, I_2, \dots, I_i]$. On peut alors récrire l'équation I.31

$$b_i^l(\mathbf{s}^i) = (1 - I_i)b_{i-1}^l(\mathbf{s}^{i-1}) + L_i(\mathbf{s}^i)I_i b \quad i \geq 1 \quad (\text{I.32})$$

avec

$$p(\mathbf{s}^i) = p(\mathbf{s}^{i-1})p(I_i) \quad (\text{I.33})$$

où $p(I_i)$ est la probabilité d'avoir un handoff, avec $p(1) = q_a$ et $p(0) = 1 - q_a$.

Définissons aussi les deux quantités auxiliaires

$$g(I_i) = (1 - I_i) \quad (\text{I.34})$$

$$h(\mathbf{s}^i) = bI_iL_i(\mathbf{s}^i). \quad (\text{I.35})$$

L'espérance sur les événements de handoff s'écrit alors

$$\begin{aligned} E[b_i^l] &= \sum_{\mathbf{s}^i} p(\mathbf{s}^i) [b_{i-1}(\mathbf{s}^{i-1})g(I_i) + h(\mathbf{s}^i)] \\ &= \sum_{\mathbf{s}^{i-1}} p(\mathbf{s}^{i-1})p(I_i) [b_{i-1}(\mathbf{s}^{i-1})g(I_i) + h(\mathbf{s}^i)] \\ &= \sum_{\mathbf{s}^{i-1}} p(\mathbf{s}^{i-1}) \sum_{I_i} p(I_i) [b_{i-1}(\mathbf{s}^{i-1})g(I_i) + h(\mathbf{s}^i)]. \end{aligned} \quad (\text{I.36})$$

Puisque L_i dépend de façon complexe de \mathbf{s}^i , nous supposons que L_i est une constante. Cette hypothèse est valide puisque la longueur de la connexion suite à un réacheminement ne varie pas beaucoup d'un handoff à un autre. Ainsi, on peut écrire

$$\begin{aligned} E[b_i^l] &= \sum_{\mathbf{s}^{i-1}} p(\mathbf{s}^{i-1})b_{i-1}(\mathbf{s}^{i-1}) \sum_{I_i} p(I_i)g(I_i) + \\ &\quad \sum_{\mathbf{s}^{i-1}} p(\mathbf{s}^{i-1}) \sum_{I_i} p(I_i)h(I_i) \end{aligned}$$

$$= E[b_{i-1}^l] \sum_{I_i} p(I_i) g(I_i) + \sum_{I_i} p(I_i) h(I_i) \quad (\text{I.37})$$

avec $\sum_{s^{i-1}} p(s^{i-1}) = 1$. On peut calculer les deux termes

$$\begin{aligned} \sum_{I_i} p(I_i) g(I_i) &= (1 - q_a)g(0) + q_a g(1) \\ g(0) &= 1 \\ g(1) &= 0 \end{aligned} \quad (\text{I.38})$$

$$\begin{aligned} \sum_{I_i} p(I_i) h(I_i) &= (1 - q_a)h(0) + q_a h(1) \\ h(0) &= 0 \\ h(1) &= \bar{L}. \end{aligned} \quad (\text{I.39})$$

En remplaçant ces expressions dans l'équation I.37, on trouve

$$E[b_i^l] = (1 - q_a)E[b_{i-1}^l] + q_a \bar{L}b. \quad (\text{I.40})$$

En posant $E[b_0^l] = \bar{L}b$, on peut résoudre la récurrence, ce qui nous donne :

$$E[b_i^l] = (1 - q_a)^i \bar{L}b + \frac{1 - (1 - q_a)^i}{q_a} q_a \bar{L}b = \bar{L}b. \quad (\text{I.41})$$

La largeur de bande totale $b_r(n)$ utilisée durant les n périodes d'un appel est donnée par

$$b_r(n) = b^l(n) + b^s(n) \quad (\text{I.42})$$

$$b^s(n) = \sum_{i=0}^{n-1} E[b_i^s] \quad (\text{I.43})$$

$$b^l(n) = \sum_{i=0}^{n-1} E[b_i]. \quad (I.44)$$

En utilisant l'équation (I.30), on trouve

$$b^s(n) = \sum_{i=0}^{n-1} q_a b_{RP} = n q_a b_{RP}. \quad (I.45)$$

De la même façon, en utilisant l'équation (I.41), on obtient

$$b^l(n) = \sum_{i=0}^{n-1} \bar{L}b = n \bar{L}b. \quad (I.46)$$

I.2.3 Largeur de bande totale

La largeur de bande moyenne par appel est donnée par

$$\begin{aligned} \bar{b}^r &= \bar{b}^s + \bar{b}^l \\ \bar{b}^s &= \sum_{n=1}^{\infty} b^s(n) P(n) \\ &= q_a b_{RP} \sum_{n=1}^{\infty} n P(n) \\ &= q_a b_{RP} \frac{1}{q_f}. \end{aligned} \quad (I.47)$$

Nous allons de même calculer la largeur de bande moyenne utile pour tous les appels en utilisant l'équation (I.46)

$$\begin{aligned}
\bar{b}^l &= \sum_{n=1}^{\infty} b^l(n)P(n) \\
&= \bar{L}b \sum_{n=1}^{\infty} nP(n) = \bar{L}b \frac{1}{q_f}
\end{aligned} \tag{I.48}$$

d'où

$$\bar{b}^r = \frac{1}{q_f}(\bar{L}b + q_a b_{RP}). \tag{I.49}$$

I.3 Le handoff hiérarchique

Dans le cas hiérarchique, deux types de handoffs peuvent se produire dans chaque intervalle de temps : handoff inter et intra sous-réseaux. Comme un handoff intra sous-réseaux ne génère pas de trafic de signalisation, cet évènement n'est pas pris en considération dans nos calculs.

Pour chaque intervalle de temps $[i, i + 1]$, on définit une variable aléatoire correspondant à l'apparition d'un handoff inter sous-réseaux et donc d'un réacheminement partiel.

$$I_i = \begin{cases} 1 & \text{si un handoff inter sous-réseaux se produit} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \tag{I.50}$$

dont la valeur moyenne est $E[I_i] = q'_a$.

Le calcul de la largeur de bande moyenne par appel suit les mêmes étapes que celles explicitées pour le handoff de réacheminement partiel en remplaçant q_a par q'_a et L_i par L_i^h .

La largeur de bande moyenne par appel du handoff hiérarchique peut s'écrire

$$\overline{b^h} = \frac{1}{q_f} (\overline{L^h} b + q'_a b_{RP}). \quad (I.51)$$

À cette largeur de bande vient s'ajouter une largeur de bande fixe due à la réservation de ressources dans les sous-réseaux b^{hs} donnée par l'équation I.52

$$b^{hs} = L^{hs}(b + b_{RP}). \quad (I.52)$$

L^{hs} est le nombre de liaisons dans les sous-réseaux. Ainsi, la largeur de bande moyenne par appel s'écrit :

$$\begin{aligned} \overline{b^h} &= \frac{1}{q_f} \overline{L^h} b + L^{hs} b \\ &\quad + q'_a \frac{1}{q_f} b_{RP} + L^{hs} b_{RP}. \end{aligned} \quad (I.53)$$

ANNEXE II

ÉVALUATION DU DÉLAI MOYEN PAR APPEL

Le délai de handoff est défini comme le délai dû à la réservation de la largeur de bande utile b plus le délai dû à l'échange de signalisation.

Comme à l'annexe I, on considère un appel dont la durée est subdivisée en intervalles discrets. Nous calculons le délai moyen d'un handoff. On fait ensuite la somme des délais moyens des handoffs sur la durée totale de vie d'un appel. Enfin, on prend la moyenne sur toutes les durées d'appel.

En se basant sur le diagramme temporel utilisé dans l'annexe I, nous définissons :

- d_i^l le délai de réservation de largeur de bande utile sur le nouveau chemin suite à un handoff dans l'intervalle de temps $]i, i + 1]$;
- d_i^s le délai de signalisation lorsqu'un handoff se produit dans cet intervalle ;
- d_i le délai d'un handoff durant l'intervalle de temps $]i, i + 1]$.

À chaque intervalle $]i, i + 1]$, nous définissons L_i^p le nombre de liaisons du chemin partiel entre le commutateur de handoff et le commutateur auquel la station de base cible est rattachée.

d_i^l et d_i^s sont des variables aléatoires qui dépendent de l'évènement de handoff dans l'intervalle i . d_i représente le délai dû à la réservation de la largeur de bande utile sur le nouveau chemin suite à un handoff plus le délai de la signalisation.

$$d_i = d_i^l + d_i^s. \quad (\text{II.1})$$

II.1 Le handoff à deux phases

On réutilise la même procédure que celle décrite dans la section I.1 pour le calcul de la largeur de bande du handoff à deux phases en remplaçant b par d . Dans ce cas le délai d_i^l qui résulte de l'équation I.4 ne dépend que des variables K_i et J_i de l'intervalle courant.

II.1.1 Délai de signalisation

Le délai de signalisation dû à la mobilité à l'instant i est donné par

$$d_i^s = K_i(d_{EC} + J_i d_{RP}) \quad i \geq 1. \quad (\text{II.2})$$

La moyenne de d_i^s , sur les événements de handoff, est donnée par :

$$E[d_i^s] = q_a(d_{EC} + p d_{RP}) \quad i \geq 1. \quad (\text{II.3})$$

II.1.2 Délai de réservation de largeur de bande utile

Le délai de réservation de largeur de bande utile dans l'intervalle de temps $[i, i+1]$ est donné par

$$d_i^l = H_i d K_i (1 - J_i) + L_i^p d K_i J_i. \quad (\text{II.4})$$

Notons qu'ici d_i^l dépend des variables aléatoires K_i et J_i de l'intervalle courant. En supposant que L_i^p et H_i varient peu avec i et sont donc des constantes, on trouve

$$E[d_i^l] = q_a((1-p)\bar{H} + p\bar{L}^p)d. \quad (\text{II.5})$$

Le délai total $d(n)$ de handoff pendant les n périodes d'un appel est donné par

$$d^p(n) = d^l(n) + d^s(n) \quad (\text{II.6})$$

$$d^s(n) = \sum_{i=0}^{n-1} E[d_i^s] \quad (\text{II.7})$$

$$d^l(n) = \sum_{i=0}^{n-1} E[d_i^l] \quad (\text{II.8})$$

avec

$$d^s(n) = q_a(d_{EC} + pd_{RP})n \quad (\text{II.9})$$

$$d^l(n) = q_a((1-p)\bar{H} + p\bar{L}^p)dn. \quad (\text{II.10})$$

Le délai moyen par appel est donné par

$$\begin{aligned} \bar{d}^p &= \sum_{n=1}^{\infty} (d^s(n) + d^l(n))P(n) \\ &= \frac{q_a}{q_f} \left[(((1-p)\bar{H} + p\bar{L}^p)d) + d_{EC} + pd_{RP} \right]. \end{aligned} \quad (\text{II.11})$$

II.2 Le handoff de réacheminement partiel

Pour calculer le délai de handoff, on utilise la même procédure que celle de l'annexe I.2 pour le calcul de la largeur de bande du handoff de réacheminement partiel. À chaque intervalle $[i, i + 1]$, nous définissons L_i^r le nombre de liaisons du chemin partiel entre le commutateur de handoff et le commutateur auquel la station de base cible est rattachée.

II.2.1 Délai de signalisation

Le délai de la signalisation dû à la mobilité à l'instant i est

$$d_i^s = I_i d_{RP}. \quad (\text{II.12})$$

Le délai moyen de d_i^s sur les événements de handoff est donné par

$$E[d_i^s] = q_a d_{RP}. \quad (\text{II.13})$$

II.2.2 Délai de réservation de la largeur de bande utile

Le délai dû à la réservation de la largeur de bande utile est

$$d_i^l = L_i^r dI_i \quad i \geq 1. \quad (\text{II.14})$$

En supposant que L_i^r est constant, on trouve

$$E[d_i^l] = q_a \bar{L}^r d. \quad (\text{II.15})$$

Le délai total $d_s(n)$ de handoff pendant les n périodes d'un appel est donné par

$$d^r(n) = d^l(n) + d^s(n) \quad (\text{II.16})$$

$$d^s(n) = \sum_{i=0}^{n-1} E[d_i^s] \quad (\text{II.17})$$

$$d^l(n) = \sum_{i=0}^{n-1} E[d_i^l] \quad (\text{II.18})$$

avec

$$d^s(n) = q_a d_{RP} n \quad (\text{II.19})$$

$$d^l(n) = q_a \bar{L}^r d n. \quad (\text{II.20})$$

Le délai moyen par appel est donné par

$$\bar{d}^r = \sum_{n=1}^{\infty} (d^s(n) + d^l(n)) P(n) \quad (\text{II.21})$$

$$= \frac{q_a}{q_f} [\bar{L}^r d + d_{RP}]. \quad (\text{II.22})$$

II.3 Le handoff hiérarchique

La procédure de calcul du délai du handoff hiérarchique est la même que celle utilisée pour le calcul du délai du handoff de réacheminement partiel. En remplaçant

L^r par L^h , le délai moyen par appel devient :

$$\overline{d^h} = \sum_{n=1}^{\infty} (d^s(n) + d^l(n))P(n) \quad (\text{II.23})$$

$$= \frac{q_a}{q_f} [\overline{L^h}d + d_{RP}] . \quad (\text{II.24})$$

ANNEXE III

CALCUL DE LA PROBABILITÉ D'ÉTAT STATIONNAIRE

III.1 Stratégie à deux phases

L'état e d'une cellule est défini comme

$$e = (i, j) \quad (\text{III.1})$$

où i est le nombre de nouveaux appels et j le nombre d'appels de handoffs. Les arrivées des appels sont indépendantes et distribuées suivant une loi de Poisson. On pose :

- q_{an} le taux d'arrivée des nouveaux appels,
- q_{ah} le taux d'arrivée des demandes de handoff,

La durée des nouveaux appels suit une loi exponentielle de moyenne $1/q_{fn}$ et celle des appels ayant subit un handoff suit une loi exponentielle de moyenne $1/q_{fh}$. On définit les trafics offerts correspondant comme $A_n = \frac{q_{an}}{q_{fn}}$ et $A_h = \frac{q_{ah}}{q_{fh}}$. $A = A_n + A_h$ est le trafic offert total.

La figure III.1 montre les transitions entre l'état (i, j) et les 4 états voisins. Les équations d'équilibres permettant le calcul des valeurs stationnaires s'écrivent

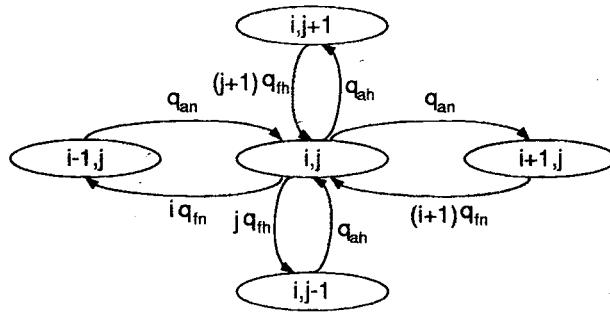


Fig. III.1 Diagramme de transition de la stratégie à deux phases

comme :

$$\begin{cases} (q_{ah} + q_{an} + j q_{fh} + i q_{fn}) P(i, j) = q_{fn}(i+1)P(i+1, j) + q_{fh}(j+1)P(i, j+1) \\ + q_{ah}P(i, j-1) + q_{an}P(i-1, j) \quad \text{avec } 0 \leq j \leq C \quad \text{et } 0 \leq i \leq C - C_h \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

avec les conditions aux frontières

$$P(i, j) = 0 \quad \text{pour tout } i < 0, \quad j < 0, \quad i > C - C_h \quad \text{ou} \quad i + j > C \quad (\text{III.3})$$

et la condition de normalisation

$$\sum_{i=0}^{C-C_h} \sum_{j=0}^{C-i} P(i, j) = 1. \quad (\text{III.4})$$

On vérifie à posteriori que la solution $P(i, j) = \frac{1}{K} \frac{A_n^i}{i!} \frac{A_h^j}{j!}$ satisfait l'équation III.2. Il s'agit d'une solution produit obtenue à partir de deux processus de naissance et de mort unidimensionnels et indépendants. Une telle solution peut être généralisée pour des systèmes à plus de deux dimensions. C'est ainsi qu'une solution produit existe pour la stratégie hiérarchique. Elle est décrite dans la section III.2.

La solution de la stratégie à deux phases s'écrit :

$$P(i, j) = \frac{A^i}{i!} \frac{A_h^j}{j!} P(0, 0) \quad \text{pour } 0 \leq i \leq C - C_h \text{ et } 0 \leq j \leq C - i. \quad (\text{III.5})$$

À partir de la condition de normalisation donnée dans l'équation III.4, on déduit la probabilité $P(0, 0)$ telle que :

$$P(0, 0)^{-1} = K = \sum_{i=0}^{C-C_h} \sum_{j=0}^{C-i} \frac{A_n^i}{i!} \frac{A_h^j}{j!}. \quad (\text{III.6})$$

On pose $A_n = (1 - \beta)A$ et $A_h = \beta A$ où β est la fraction de trafic offert de handoffs A_h sur le trafic total offert A . Les équations III.5 et III.6 s'écrivent :

$$P(i, j) = \frac{A^{(i+j)}}{K} \frac{(1 - \beta)^i}{i!} \frac{\beta^j}{j!} \quad (\text{III.7})$$

et

$$K = \sum_{i=0}^{C-C_h} \sum_{j=0}^{C-i} A^{(i+j)} \frac{(1 - \beta)^i}{i!} \frac{\beta^j}{j!}. \quad (\text{III.8})$$

III.2 Stratégie hiérarchique

On définit trois types d'appels pour la stratégie hiérarchique : nouveaux appels, handoffs intra sous-réseaux et handoffs inter sous-réseaux. L'état e de la cellule est défini comme

$$e = (i, j, k) \quad (\text{III.9})$$

où :

- i est le nombre de nouveaux appels,

- j est le nombre d'appels de handoffs intra sous-réseaux,
- k est le nombre d'appels de handoffs inter sous-réseaux.

Les arrivées des nouveaux appels et des handoffs intra et inter sous-réseaux sont indépendantes et suivent une loi de Poisson. Les temps de service suivent une loi exponentielle. On pose :

- q_{an} taux d'arrivée des nouveaux appels,
- q_{ah1} taux d'arrivée des handoff intra sous-réseaux,
- q_{ah2} taux d'arrivée des handoff inter sous-réseaux,
- q_{fn} le paramètre de la loi exponentielle de la durée des nouveaux appels,
- q_{fh1} le paramètre de la loi exponentielle de la durée des appels de handoffs intra sous-réseaux,
- q_{fh2} le paramètre de la loi exponentielle de la durée des appels de handoffs inter sous-réseaux.

On introduit les trafics offerts correspondant $A_n = \frac{q_{an}}{q_{fn}}$, $A_{h1} = \frac{q_{ah1}}{q_{fh1}}$, $A_{h2} = \frac{q_{ah2}}{q_{fh2}}$ ainsi que le trafic offert total $A = A_n + A_{h1} + A_{h2}$.

La solution produit de la stratégie s'écrit :

$$P(i, j, k) = \frac{A_n^i}{i!} \frac{A_{h1}^j}{j!} \frac{A_{h2}^k}{k!} P(0, 0, 0). \quad (\text{III.10})$$

La probabilité $P(0, 0, 0)$ est calculée en utilisant la condition de normalisation pour $(C_{h1} + C_{h2}) \leq C$ et $(C_{h1} + C_{h2}) > C$:

- cas 1 : $(C_{h1} + C_{h2}) \leq C$

$$\sum_{i=0}^{C_{h2}} \sum_{j=0}^{C-C_{h2}} \sum_{k=0}^{C-i-j} P(i, j, k) + \sum_{i=C_{h2}+1}^{C-C_{h1}} \sum_{j=0}^{C-i} \sum_{k=0}^{C-i-j} P(i, j, k) = 1 \quad (\text{III.11})$$

$$P(0,0,0) = K = \sum_{i=0}^{C_{h2}} \sum_{j=0}^{C-C_{h2}} \sum_{k=0}^{C-i-j} \frac{A_n^i}{i!} \frac{A_{h1}^j}{j!} \frac{A_{h2}^k}{k!} + \sum_{i=C_{h2}+1}^{C-C_{h1}} \sum_{j=0}^{C-i} \sum_{k=0}^{C-i-j} \frac{A_n^i}{i!} \frac{A_{h1}^j}{j!} \frac{A_{h2}^k}{k!}, \quad (\text{III.12})$$

- cas 2 : $C_{h1} + C_{h2} > C$

$$\sum_{i=0}^{C-C_{h1}} \sum_{j=0}^{C-C_{h2}} \sum_{k=0}^{C-i-j} P(i,j,k) = 1 \quad (\text{III.13})$$

$$P(0,0,0) = K = \sum_{i=0}^{C-C_{h1}} \sum_{j=0}^{C-C_{h2}} \sum_{k=0}^{C-i-j} \frac{A_n^i}{i!} \frac{A_{h1}^j}{j!} \frac{A_{h2}^k}{k!}. \quad (\text{III.14})$$

On pose $A_n = (1 - \beta_{h1} - \beta_{h2})$, $A_{h1} = \beta_{h1}A$ et $A_{h2} = \beta_{h2}A$ où β_{h1} est la fraction du trafic de handoff intra sous-réseaux A_{h1} sur le trafic total offert A et β_{h2} est la fraction du trafic de handoff inter sous-réseaux A_{h2} sur le trafic total offert A . La probabilité $P(i,j,k)$ s'écrit :

- cas 1 : $(C_{h1} + C_{h2}) \leq C$

$$P(0,0,0) = K = \sum_{i=0}^{C_{h2}} \sum_{j=0}^{C-C_{h2}} \sum_{k=0}^{C-i-j} A^{(i+j+k)} \frac{(1 - \beta_{h1} - \beta_{h2})^i}{i!} \frac{\beta_{h1}^j}{j!} \frac{\beta_{h2}^k}{k!} + \sum_{i=C_{h2}+1}^{C-C_{h1}} \sum_{j=0}^{C-i} \sum_{k=0}^{C-i-j} A^{(i+j+k)} \frac{(1 - \beta_{h1} - \beta_{h2})^i}{i!} \frac{\beta_{h1}^j}{j!} \frac{\beta_{h2}^k}{k!}, \quad (\text{III.15})$$

- cas 2 : $C_{h1} + C_{h2} > C$

$$\sum_{i=0}^{C-C_{h1}} \sum_{j=0}^{C-C_{h2}} \sum_{k=0}^{C-i-j} P(i,j,k) = 1 \quad (\text{III.16})$$

$$P(0,0,0) = K = \sum_{i=0}^{C-C_{h1}} \sum_{j=0}^{C-C_{h2}} \sum_{k=0}^{C-i-j} A^{(i+j+k)} \frac{(1 - \beta_{h1} - \beta_{h2})^i}{i!} \frac{\beta_{h1}^j}{j!} \frac{\beta_{h2}^k}{k!}. \quad (\text{III.17})$$

ANNEXE IV

ESTIMATION DE LA VALEUR DU PARAMÈTRE θ

Pour estimer la fraction des handoffs inter sous-réseaux θ , nous considérons un réseau ATM avec différents niveaux de hiérarchie L^h . Le réseaux comprend un ensemble de sous-réseaux connectés entre-eux par le biais de commutateurs ATM. Chaque sous-réseau dans lequel les ressources sont réservées regroupe N cellules radio (voir figure IV.1). Pour estimer θ nous supposons que :

- Le nombre de cellules radio dans chaque sous-réseau est $N = 32$.
- Le nombre maximal de niveaux hiérarchiques est égal à 3 (c'est-à-dire que L^h prend les valeurs 1, 2, 3).
- Le nombre maximal de handoffs inter sous-réseaux entre deux sous-réseaux est égal à 20 (voir figure IV.1).

Ces hypothèses représentent un modèle assez réaliste pour un réseau de taille moyenne. Leur interprétation va nous permettre d'estimer une valeur de θ qui soit physiquement réaliste.

Pour calculer θ , nous comptons tout simplement le nombre possible de handoffs inter et intra sous-réseaux pour la topologie décrite ci-dessus en fonction des différents niveaux de hiérarchie admissibles. θ représente alors simplement le rapport entre le nombre de handoffs inter-sous-réseaux par rapport au nombre total de handoffs (inter et intra sous-réseaux). Par dénombrement direct, les valeurs suivantes ont été obtenues :

- 376 handoffs intra sous-réseaux et 20 handoffs inter-sous-réseaux pour $L^h = 1$,

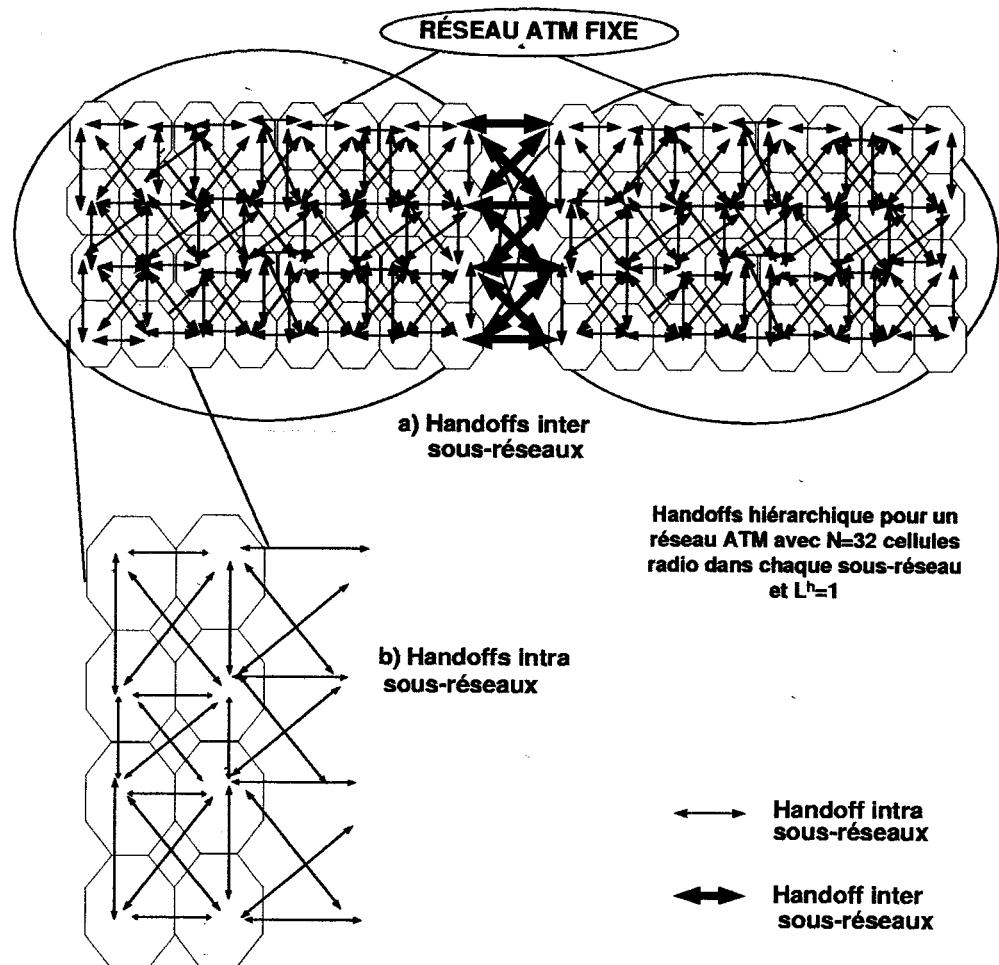


Fig. IV.1 Calcul du nombre de handoffs

- 752 handoffs intra sous-réseaux et 60 handoffs inter-sous-réseaux pour $L^h = 2$,
- 1504 handoffs intra sous-réseaux et 140 handoffs inter sous-réseaux pour $L^h = 3$,

d'où les valeurs suivantes de θ :

$$\theta = \begin{cases} 0.05 & \text{pour } L^h = 1 \\ 0.07 & \text{pour } L^h = 2 \\ 0.09 & \text{pour } L^h = 3 \end{cases} \quad (\text{IV.1})$$